



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

# ÚNAVOVÉ CHOVÁNÍ VYSOKOPEVNOSTNÍCH OCELÍ (S460, S690 A S960) PO KOROZI

FATIGUE BEHAVIOR OF HIGH STRENGTH STEELS (S460, S690 AND S960) AFTER  
CORROSION

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ANNA BENEŠOVÁ

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. STANISLAV SEITL, Ph.D.

BRNO 2024

## Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav stavební mechaniky
Studentka:	<b>Bc. Anna Benešová</b>
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Stanislav Seitl, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2023/24
Studijní program:	N0732A260026 Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Únavové chování vysokopevnostních ocelí (S460, S690 a S960) po korozi**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Aby bylo možno posoudit životnost konstrukcí z vysokopevnostní oceli ještě před jejím vyrobením, je třeba znát i její únavové chování při korozi. Korodovaný materiál se porušuje již při menším napětí, než odpovídá mezi únavy (S-N křivka se výrazně mění, chybí jí vodorovná část). Student v rámci diplomové práce porovná naměřené referenční S-N křivky a S-N křivky stejného materiálu po různém stupni koroze. Následně provede kvantifikaci iniciačního koncentrátoru napětí vzniklého v důsledku koroze a v software ANSYS nasimuluje změnu koncentrace napětí.

#### **Cíle a výstupy diplomové práce:**

Student/ka:

- Vypracujte stručný přehled o korozi a únavovém chování vysokopevnostních konstrukčních ocelí S460, S690 a S960.
- Provede analýzu lomových povrchů se zaměřením na iniciační koncentrátor napětí v důsledku koroze.
- Na základě znalosti velikosti iniciačního koncentrátoru napětí provede numerické simulace koncentrace napětí v software ANSYS.

#### **Seznam doporučené literatury a podklady:**

1. Chen, Ch., Jie, Z., Wang, K., 2021. Fatigue life evaluation of high-strength steel wires with multiple corrosion pits based on the TCD. Journal of Constructional Steel Research 186, paper 106913.
2. Cui, W., 2002. A state-of-the-art review on fatigue life prediction methods for metal structures. Journal of Marine Science and Technology 7(1), 43–56.
3. Jiang, C., Wu, C. Jiang, X., 2018. Experimental study on fatigue performance of corroded high-strength steel wires used in bridges. Construction and Building Materials 187, 681–690.

4. Klesnil, M, Lukáš, P., 1992. *Fatigue of Metallic Materials*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam. 270 p.
5. Kubzová, M., Křivý, V., Kreislová, K., 2020. Probabilistic prediction of corrosion damage of steel structures in the vicinity of roads. *Sustainability*. BASEL: MDPI Open Access Publishing, 12(23), paper 9851.
6. Kunz, L., Lukáš, P., Klusák, J. 2012. *Fatigue Strength of Weathering Steel*. *Materials Science* 18(1), 18–22.
7. Malíková, L., Doubek, P., Juhászová, T., Klusák, J., Seitl, S., 2022. Interaction of a fatigue crack and a corrosion dimple in a high-strength steel specimen. *Procedia Structural Integrity* 42, 1082–1089.
8. Pook, L.P., 2000. *Linear Elastic Fracture Mechanics for Engineers: Theory and Applications* 1st ed., London: WIT Press.
9. Schijve, J.: 2003. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art, *Int J Fatigue*, 25, 679–702.
10. Schütz, W.A., 1996. A history of fatigue. *Engineering Fracture Mechanics* 54(2), 263–300.
11. Seitl, S, Miarka, P., Pokorný, P., Klusák, J., 2019. Influence of corrosion on fatigue behaviour of old crane runway steel. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design* 54, 416–423.
12. Studnička, J. 2003. *Ocelové konstrukce 10: Normy pro navrhování*. První. Praha: Vydavatelství ČVUT, 125 s.
13. Studnička, J. 2006. *Ocelové konstrukce. Druhé přepracované*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 147 s.
14. Suresh, S.: *Fatigue of Materials* (2nd ed.), Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK (1998)
15. Tada, H., Paul C. Paris a G. R. Irwin. 2000. *The stress analysis of cracks handbook*. 3rd ed. New York: ASME Press.
16. Vejvoda, S.; Aldabaghová, Z. ČSN EN 1993-1-9: Navrhování ocelových konstrukcí – část 1-9: Únava. Praha: Český normalizační institut, 2006. 44 s

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 18. 1. 2023

L. S.

---

prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.  
vedoucí ústavu

---

doc. Ing. Stanislav Seitl, Ph.D.  
vedoucí práce

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.  
děkan

## ABSTRAKT

Předmětem této diplomové práce je problematika spolupůsobení únavového namáhání a koroze na vysokopevnostní ocel. Konkrétně vysokopevnostní oceli byly S 460, S 690 a S 960. V této práci jsou uvedeny výsledky únavových experimentů na zkušebních vzorcích, které byly degradovány čtyřmi druhy koroze, převážně v umělých atmosférách. Následně z těchto dat byly vypočítány únavové modely, které popisují únavové chování těchto ocelí a byly mezi sebou porovnány. Na závěr byly provedeny fotografie lomových ploch porušených vzorků těchto ocelí, které byly analyzovány a s jejich pomocí spolu s vytvořenými únavovými modely bylo diskutováno jejich únavové chování.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Únava, koroze, vysokopevnostní ocel, Basquin, Castillo–Canteli, Kohout a Věchet, únavový lom.

## ABSTRACT

The subject of this diploma thesis is the issue of the interaction of fatigue stress and corrosion on high-strength steel. Specifically, S 460, S 690, S 960 were selected. This work presents the results of fatigue experiments on test samples that were degraded by four types of corrosion, mainly in artificial atmospheres. Subsequently, fatigue models were calculated from these data, which describe the fatigue behavior of these steels and were compared with each other. At the end, photographs of fracture surfaces of broken samples of these steels were taken, which were analyzed and their fatigue behavior was discussed with their help together with the created fatigue models.

## KEYWORDS

Fatigue, corrosion, high-strength steel, Basquin, Castillo–Canteli, Kohout and Věchet, fatigue fracture.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BENEŠOVÁ, Anna. *Únavové chování vysokopevnostních ocelí (S460, S690 a S960) po korozi*. Brno, 2024. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí doc. Ing. Stanislav Seitl, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Únavové chování vysokopevnostních ocelí (S460, S690 a S960) po korozi* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. 1. 2024

---

Bc. Anna Benešová  
autor

## Poděkování

Chtěla bych tímto poděkovat svému vedoucímu práce panu doc. Ing. Stanislavu Seitlovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, ochotu a vstřícnost při konzultacích během vypracovávání mé diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat panu Ing. Petru Miarkovi, Ph.D. za ochotu a odborné rady po celou dobu mého studia.

Děkuji také všem pracovníkům Ústavu fyziky materiálů AV ČR, v. v. i. za poskytnutí dat a pomoc.

V neposlední řadě bych chtěla také velmi poděkovat své rodině a přátelům, za pomoc a oporu, kterou mi za celou dobu studia poskytli.

Data pro mou práci byla získána za finanční podpory projektů:

- 21-14886S – Vliv materiálových vlastností vysokopevnostních ocelí na trvanlivost inženýrských staveb a mostů
- FAST-S-23-8216 – Analýza únavového chování vysokopevnostních ocelí poškozených různým stupněm koroze



# Obsah

ÚVOD.....	11
CÍL PRÁCE.....	12
<b>1. OCEL VYŠŠÍCH PEVNOSTÍ .....</b>	<b>13</b>
1.1. CHEMICKÉ SLOŽENÍ .....	13
1.2. MECHANICKÉ VLASTNOSTI .....	13
1.2.1. Pracovní diagram.....	13
1.2.2. Vrubová houževnatost.....	15
1.2.3. Svařitelnost.....	15
1.3. TAHOVÉ ZKOUŠKY TESTOVANÝCH OCELÍ.....	15
1.3.1. Vlastnosti oceli S 460.....	16
1.3.2. Pracovní diagram oceli S 690.....	17
1.3.3. Pracovní diagram oceli S 960.....	18
<b>2. KOROZE KOVŮ .....</b>	<b>19</b>
2.1. DĚLENÍ KOROZE PODLE TYPU DĚJE .....	19
2.1.1. Chemická koroze.....	19
2.1.2. Elektrochemická koroze.....	19
2.1.3. Koroze bludnými proudy.....	19
2.2. DĚLENÍ PODLE FORMY ZNEHODNOCENÍ .....	20
2.2.1. Rovnoměrné formy .....	20
2.2.2. Nerovnoměrné formy .....	20
2.2.3. Strukturní formy .....	22
<b>3. ŘÍZENÁ KOROZE .....</b>	<b>23</b>
3.1. TAHOVÉ ZKOUŠKY KORODOVANÝCH OCELÍ .....	24
<b>4. ÚNAVA .....</b>	<b>26</b>
4.1. PARAMETRY CYKLICKÉHO ZATĚŽOVÁNÍ .....	26
4.2. KŘIVKY ŽIVOTNOSTI.....	28
4.3. ÚNAVOVÉ MODELY .....	29
4.3.1. Basquinův model .....	29
4.3.2. Kohoutův a Věchetův model.....	30
4.3.3. Castillo–Canteli model.....	32
<b>5. ÚNAVOVÉ ZKOUŠKY TESTOVANÝCH OCELÍ .....</b>	<b>37</b>
5.1. ÚNAVOVÉ MODELY S 460.....	39
5.2. ÚNAVOVÉ MODELY S 690.....	41
5.3. ÚNAVOVÉ MODELY S 960.....	43
5.4. POROVNÁNÍ ÚNAVOVÉHO CHOVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH DRUHŮ OCELÍ .....	45
<b>6. STÁDIA ÚNAVOVÉHO PROCESU .....</b>	<b>51</b>
6.1. STÁDIUM ZMĚN MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	51
6.2. STÁDIUM NUKLEACE TRHLIN .....	54
6.3. STÁDIUM RŮSTU TRHLIN .....	55
6.4. KONEČNÝ LOM.....	57
<b>7. POZOROVÁNÍ LOMOVÝCH PLOCH TESTOVANÝCH OCELÍ.....</b>	<b>58</b>
7.1. S 460.....	58
7.2. S 690.....	65
7.3. S 960.....	71

<b>8. VYUŽITÍ DAT Z EXPERIMENTŮ PRO VÝPOČTY V PROGRAMU ANSYS .....</b>	<b>77</b>
<b>9. ZÁVĚR.....</b>	<b>79</b>
9.1. <b>MOŽNOST DALŠÍHO POSTUPU .....</b>	<b>80</b>
<b>ZDROJE .....</b>	<b>81</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>84</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>87</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>88</b>
<b>CURRICULUM VITAE.....</b>	<b>93</b>

## Úvod

Samotný vývoj ocelí vyšší jakosti začal už v 60. letech minulého století, avšak ještě do let 90. se za ocel vysokopevnostní brala ocel s mezí kluzu 355 MPa (S 355). Postupem času se do norem a možností použití začaly přidávat i oceli S 420 a S 460. Pro současné použití byla nakonec vydána konečná verze ocelářské normy ČSN EN 1993-1-1, ve které byly všechny výše zmíněné druhy ocelí kategorizovány jako běžné. Přesto se však stále užívá neoficiální označení, které oceli S 420 a S 460 udává jako „ocel vyšší pevnosti“. Nejvyšší třídy pevnosti oceli se zpravidla používají v lodním a automobilovém průmyslu, v posledních letech ale dochází k nárůstu využití vysokopevnostních ocelí i ve stavebnictví. [1]

Ve srovnání s tradičními stavebními materiály má vysokopevnostní ocel lepší vlastnosti. Jedná se například o spolehlivost, kdy vysokopevnostní oceli mají oproti běžným ocelím menší rozptyl vlastností. Dále je to vysoká pevnost, dobrá houževnatost, svařitelnost a trvanlivost. Ve stavebnictví i strojírenství může použití vysokopevnostní oceli účinně zmenšit velikost dílů a svarů, snížit náklady a zlepšit únavovou pevnost konstrukcí při cyklickém namáhání. Nevýhodou však zůstává vyšší cena a menší dostupnost. I to se však postupem času mění a čím dál více firem nabízí ve svém sortimentu válcované tyče a ploché výrobky vyšších pevností. [1,2]

Na ocelové konstrukce, však může mít negativní vliv únavové namáhání a koroze materiálu.

Únava materiálu vzniká, pokud je konstrukce opakovaně (cyklicky) zatěžována. Únosnost při takovémto způsobu namáhání se výrazně snižuje oproti únosnosti ve statickém působení. Při únavovém namáhání dochází v materiálu ke kumulaci plastických deformací, které mají za následek nevratné změny ve struktuře materiálu a následný vznik a růst trhlin, po kterých může dojít až k selhání konstrukce.

Koroze kovů vzniká oxidací způsobenou látkami v okolním prostředí. Koroze postupem času oslabuje průřez a tvoří na povrchu koncentrátoři napětí. To vede ke snížení únavové pevnosti oceli a představuje hrozbu pro bezpečnost a spolehlivost konstrukce. Snížení únavové pevnosti způsobené korozi obvykle závisí na typu oceli a době koroze. [3]

Konstrukce, u kterých hrozí toto nebezpečí nejvíce, se nachází v prostředí s vysokou vlhkostí. Ve stavitelství se jedná například o stavby v mořském prostředí (plošiny, přístavy) nebo o mostní konstrukce. Kabely a závěsná lana u mostů jsou kritickými komponenty a jsou značně náchylné k únavovému poškození. Výzkumem této problematiky by se mohlo například dosáhnout efektivních návrhů pro výměnu (nastavení/doporučení pro servisní interval) takto namáhaných komponentů a včasnému zabránění nehod. [4, 5]

## Cíl práce

Cílem této práce je kvantifikovat změnu vybraných mechanických vlastností oceli, pokud je zatížena různými stupni koroze a únavou. Porovnat vzájemně jejich výsledky a zhodnotit jejich vhodnost či upozornit na rizika spojená s jejich použitím, při této kombinaci nepříznivých podmínek.

Pro testování v této práci byly zvoleny tři druhy ocelí s vyšší mezí kluzu, oproti běžným ocelím (S 235 a S 355), které se ve stavebnictví převážně používají. Konkrétně se jedná o ocel S 460, S 690 a S 960, díky kterým můžeme sledovat rozdíl v chování v závislosti na zvyšující se pevnosti oceli.

Byl zvolen tento postup:

- Provedení tahové zkoušky na referenčních vzorcích (tedy bez koroze).
- Odzkoušení všech korodovaných i nekorodovaných (referenčních) vzorků únavovými zkouškami.
- Z takto získaných dat vypočítat únavové modely a zhodnotit, zda je jejich predikce únavového chování vhodná pro tyto materiály. Konkrétně jsou to modely Basquina, Caastilla–Canteliho a Kohouta a Věcheta.
- Pořízení fotografií lomových ploch odzkoušených vzorků a následně porovnat velikost lomových ploch, pásem urychleného rozvoje a případné délky iniciačních trhlin, v závislosti na druhu materiálu, způsobu koroze a počtu cyklů, kterým bylo těleso vystaveno.
- Na závěr zhodnotit výsledky z naměřených dat a výpočtů a přednést úvahy o možném dalším postupu v této problematice

# 1. Ocel vyšších pevností

Existují dva způsoby, jak dosáhnout vyšší meze kluzu oceli. Jedná se o legování a tepelné zpracování.

## Legování

Legování spočívá v přidávání jiných látek (legovacích prvků, legur) do oceli, pro zlepšení jejich vlastností. Podle množství legovacích prvků se oceli rozlišují na nízkolegované (do 4 % legur), středně legované (5–10 %) a vysokolegované oceli (nad 10 %).

Nevýhodou tohoto postupu je nepříznivé ovlivnění dalších mechanických a také technologických vlastností. S vyšším množstvím legur klesá především vrubová houževnatost, tažnost a svařitelnost oceli. [1]

## Tepelné zpracování

Tepelné zpracování mění mikrostrukturu a velikost zrn. Vysokopevnostní ocel se nejčastěji vyrábí pomocí řízeného termomechanického válcování, nebo kalením a následným popouštěním. Díky tomu je dosaženo jemnozrnné struktury, která zvyšuje pevnost a není již potřeba přidávat legující prvky, které omezují zpracovatelnost oceli. [1]

### 1.1. Chemické složení

Tepelně zpracovaná ocel má v zásadě stejné chemické složení, jako ocel běžná. Legovaná ocel a ocel, která byla upravena kombinací termomechanického válcování a legování má chemické složení odlišné od běžné oceli o obsah legur, které byly do oceli přidány. [1]

Pro stanovení hodnoty uhlíkového ekvivalentu se používá vzorec:

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}. \quad (1)$$

### 1.2. Mechanické vlastnosti

Některé mechanické vlastnosti vysokopevnostních ocelí jsou lepší, oproti běžným ocelím. Není tomu tak ale u všech. Některé vlastnosti ocelí vyšších pevností zůstávají bez větších změn a některé z vlastností se dokonce zhoršují.

#### 1.2.1. Pracovní diagram

Tahová zkouška je jednou z nejběžnějších zkoušek pro ocelové materiály a určují se s ní základní mechanické vlastnosti oceli. Zkouška probíhá na tahovém zařízení, kdy je vzorek namáhán tahem až do lomu. Výsledkem zkoušky je tahový diagram (pracovní diagram), ze kterého lze určit dané vlastnosti. Udává závislost napětí  $R$  na prodloužení  $e$ . Níže jsou rozepsány některé důležité hodnoty, které se z tahových diagramů odečítají. Jejich lokace v grafu je popsána na obr. 1.1.

#### Mez kluzu $R_{p0,2}$

Mez kluzu je smluvní hodnotou a je definována jako napětí při kterém je dosaženo trvalé deformace rovné 0,2 %.

#### Mez pevnosti v tahu $R_m$

Je napětí odpovídající maximálnímu zatížení

#### Horní mez kluzu $R_{eH}$

Je to maximální hodnota napětí před prvním poklesem zatížení

#### Dolní mez kluzu $R_{eL}$

Je to nejnižší hodnota napětí během plastického kluzu, která ignoruje jakékoliv počáteční přechodové jevy.

## Tažnost A

Při testování vzorku dochází k jeho protažení viz obr. 1.2, při kterém se zmenší jeho průřezová plocha z počáteční  $S_o$  na konečnou minimální  $S_u$ . Zároveň se těleso protáhne z původní měřené délky  $L_o$  na konečnou měřenou délku  $L_u$ . Vzorce pro výpočty prodloužení jsou rozepsány níže. [6]

Plastické prodloužení v procentech při maximálním zatížení:

$$A_g = \left( \frac{\Delta L_m}{L_e} - \frac{R_m}{m_E} \right) * 100, \quad (2)$$

kde  $\Delta L_m$  je prodloužení měřené průtahoměrem při maximálním zatížení,  $L_e$  měřená délka průtahoměru a  $m_E$  je směrnice pružné části závislosti napětí – prodloužení.

Celkové prodloužení v procentech při maximálním zatížení:

$$A_{gt} = \frac{\Delta L_m}{L_e} * 100 . \quad (3)$$

Celková tažnost:

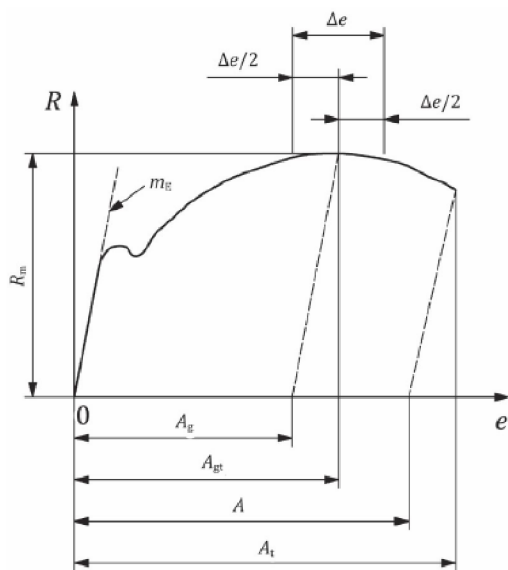
$$A_t = \frac{\Delta L_f}{L_e} * 100 , \quad (4)$$

kde  $\Delta L_f$  je prodloužení měřené průtahoměrem v okamžiku lomu.

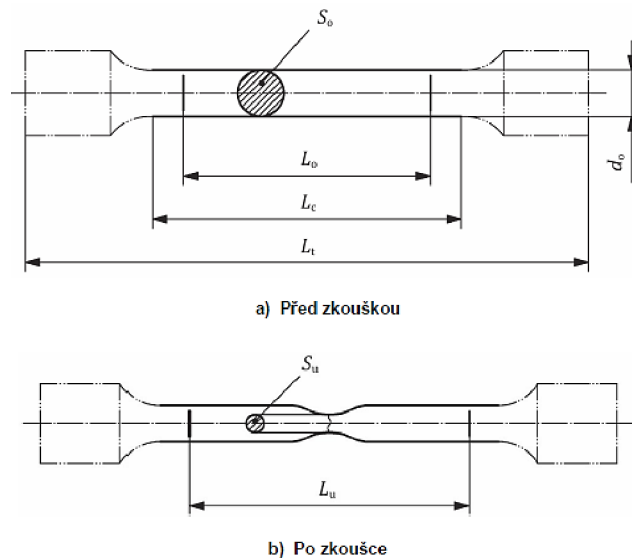
Tažnost:

$$A = \frac{L_u - L_o}{L_o} * 100 . \quad (5)$$

Obecně je tažnost vysokopevnostních ocelí nižší. To do jisté míry limituje použití vysokopevnostních ocelí. Dostatečná tažnost materiálu má zajistit zamezení vzniku náhlého křehkého lomu a je k tomu třeba, aby obsah uhlíku byl mezi 0,15 až 0,30 %. Přesto nové výrobní postupy dosahují postupně vyšších tažností u vysokopevnostních ocelí.



Obr. 1.1: Tahový diagram [6]



Obr. 1.2: Schéma protažení vzorku během testu [6]

### 1.2.2. Vrubová houževnatost

Zjišťuje se pomocí Charpyho zkoušky. U vysokopevnostních ocelí závisí úroveň vrubové houževnatosti zejména na chemickém složení a technologii výroby. Bylo zjištěno, že při termomechanické válcování dosahují vysokopevnostní oceli výborné vrubové houževnatosti. [1]

### 1.2.3. Svařitelnost

Svařitelnost oceli je ovlivněna zejména jejím chemickým složením. To lze kvantifikovat tzv. uhlíkovým ekvivalentem  $C_e$ , který vyjadřuje příspěvek jednotlivých legur ke kvalitě oceli. Obecně lze říct, že se vzrůstající hodnotou  $C_e$  svařitelnost oceli klesá. [1]

Uhlíkový ekvivalent s rostoucí třídou oceli stoupá. Oceli třídy S 420 mají  $C_e \approx 0,3 \%$ , oproti tomu pro oceli třídy S 1100 nabývá  $C_e \approx 0,6 \%$ . To tedy znamená, že vysokopevnostní oceli mají horší svařitelnost než běžná ocel. [1]

## 1.3. Tahové zkoušky testovaných ocelí

Pro tuto práci byly provedeny tahové zkoušky, pro všechny tři druhy zkoumaných ocelí (S 460, S 690 a S 960). Testováno bylo vždy 5 vzorků podle normy ČSN EN ISO 6892-1 o zkouškách kovových materiálů tahem a jejich hodnoty byly zprůměrovány.

V podkapitolách níže jsou uvedeny pouze vypočítané průměrné hodnoty, podle vzorců (6, 7 a 8), z dat získaných ze zkoušek a obrázky tahových diagramů. Kompletní soubor dat z tahových zkoušek je zaznamenán v příloze 1.

Aritmetický průměr:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i , \quad (6)$$

kde  $x_i$  jsou naměřené hodnoty a  $N$  je počet naměřených hodnot.

Výběrová směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} . \quad (7)$$

Variační koeficient:

$$v_x = \frac{s}{\bar{x}} * 100 [\%] . \quad (8)$$

### 1.3.1. Vlastnosti oceli S 460

V tabulce 1.1 jsou rozepsané hmotnostní podíly chemických prvků, které se vyskytovaly ve studované oceli S 460.

Tab. 1.1: Chemické složení oceli S 460 dle výrobce

Ocel: S 460														
Hmotnostní podíl v [%]														
C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	Ti	N	B
0,172	0,465	1,670	0,017	0,001	0,017	0,036	0,016	0,009	0,010	0,111	0,003	0,002	0,025	0,000

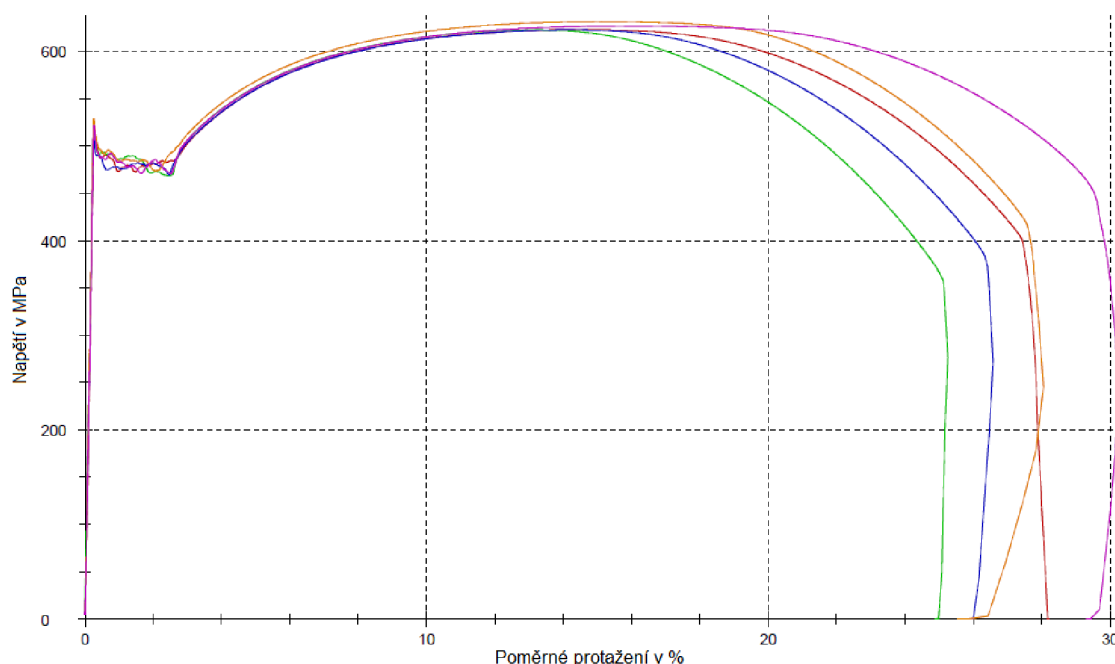
Uhlíkový ekvivalent:

$$CEV = 0,485 \%$$

Pracovní diagramy oceli třídy S460 pro pět zkušebních těles jsou uvedeny na Obr. 1.3 následně v Tab.1.2. jsou uvedeny dosažené průměrné hodnoty pro S460.

Tab. 1.2: Zprůměrované hodnoty materiálových vlastností oceli S 460

S460	$R_{p0,2}$	$R_m$	$A_g$	$A$
	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
$\bar{x}$	491,00	625,00	14,20	27,30
$s$	3,55	3,83	1,01	1,86
$v_x$	0,72	0,61	7,15	6,80



Obr. 1.3: Tahový diagram oceli S 460 pro pět zkušebních těles



### 1.3.2. Pracovní diagram oceli S 690

V tabulce 1.3 jsou rozepsané hmotnostní podíly chemických prvků, které se vyskytovaly ve studované oceli S 690.

Tab. 1.3: Chemické složení oceli S 690 dle výrobce

Ocel: S 690															
Hmotnostní podíl v [%]															
C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	Ti	N	B	Zr
0,078	0,396	1,645	0,009	0,001	0,103	0,169	0,175	0,223	0,013	0,033	0,029	0,003	0,004	0,001	0,002

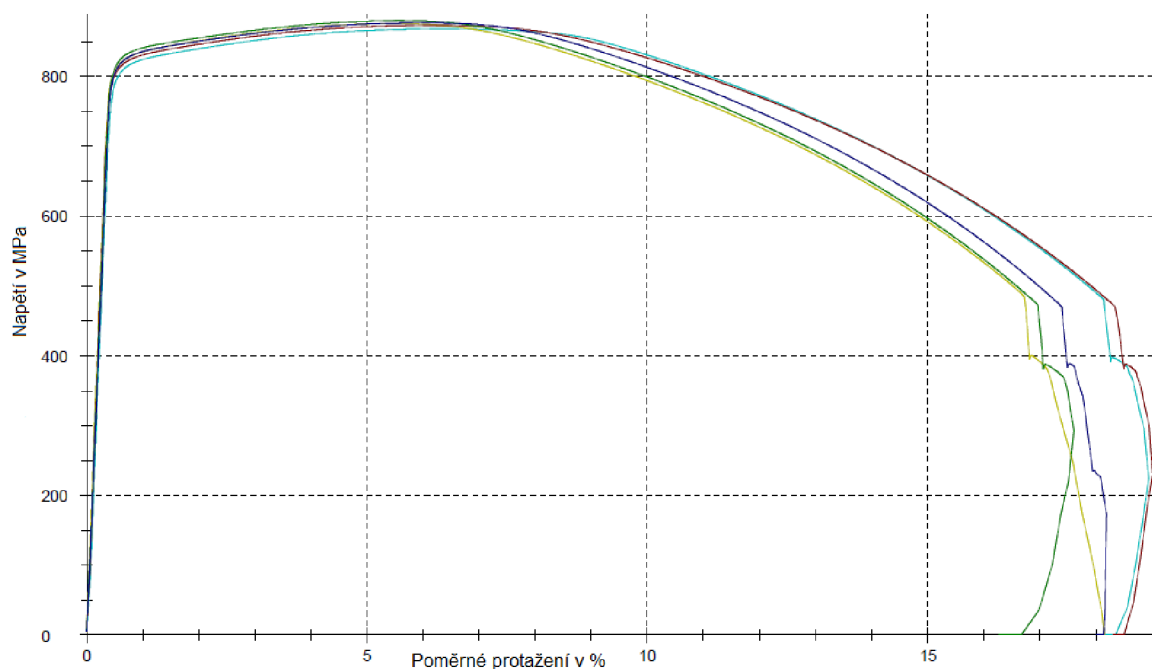
Uhlíkový ekvivalent:

$$CEV = 0,45 \%$$

Pracovní diagramy oceli třídy S 690 pro pět zkušebních těles jsou uvedeny na Obr. 1.4 následně v Tab.1.4. jsou uvedeny dosažené průměrné hodnoty pro S 690.

Tab. 1.4: Zprůměrované hodnoty materiálových vlastností oceli S 690

S690	$R_{p0,2}$	$R_m$	$A_g$	$A$
	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
$\bar{x}$	817,00	875,00	5,49	17,90
$s$	6,88	4,38	0,40	0,70
$v_x$	0,84	0,50	7,35	4,12



Obr. 1.4: Tahový diagram oceli S 690 pro pět zkušebních těles

### 1.3.3. Pracovní diagram oceli S 960

V tabulce 1.5 jsou rozepsané hmotnostní podíly chemických prvků, které se vyskytovaly ve studované oceli S 960.

Tab. 1.5: Chemické složení oceli S 960 dle výrobce

Ocel: S 960															
Hmotnostní podíl v [%]															
C	Si	Mn	P	S	Al-G	B-G	Cr	Cu	Mo	N	Nb	Ni	Ti	V	Zr
0,172	0,259	1,095	0,007	0,001	0,095	0,003	0,621	0,029	0,608	0,004	0,029	0,028	0,004	0,002	0,001

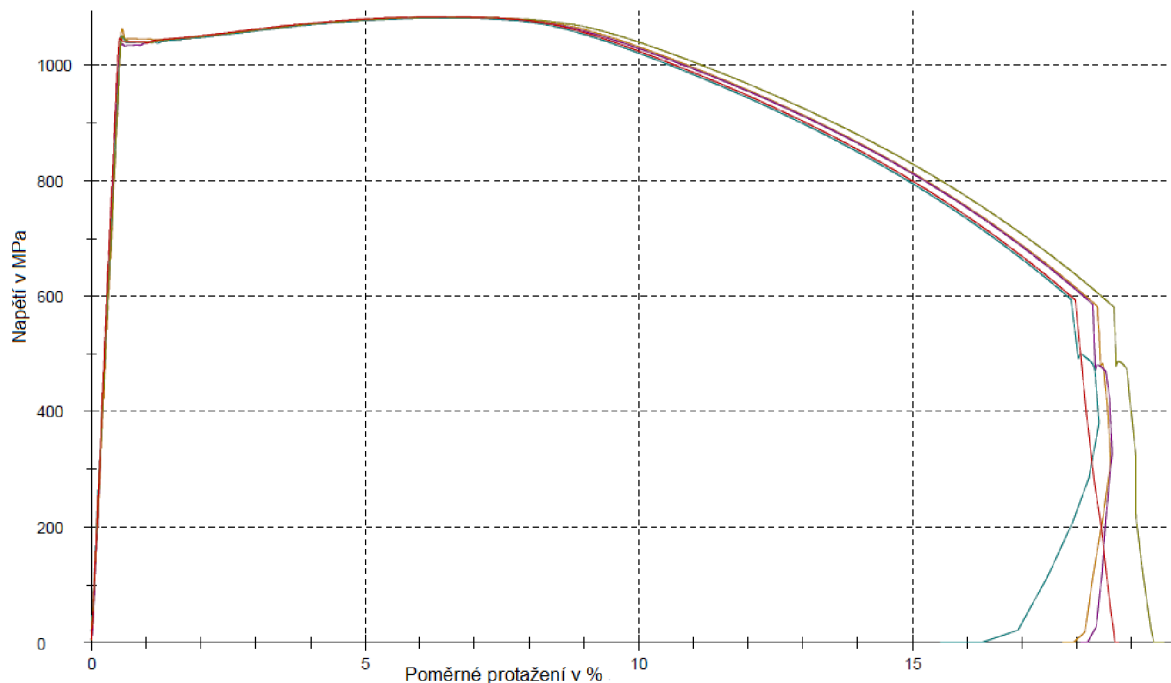
Uhlíkový ekvivalent:

$$CEV = 0,605 \%$$

Pracovní diagramy oceli třídy S 960 pro pět zkušebních těles jsou uvedeny na Obr. 1.5 následně v Tab.1.6. jsou uvedeny dosažené průměrné hodnoty pro S 960.

Tab. 1.6: Zprůměrované hodnoty materiálových vlastností oceli S 960

S960	$R_{p0,2}$	$R_m$	$A_g$	$A$
	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
$\bar{x}$	1040,00	966,00	8,33	18,20
$s$	3,99	260,90	5,31	0,40
$v_x$	0,38	27,00	63,76	1,95



Obr. 1.5: Tahový diagram oceli S 960 pro pět zkušebních těles

## 2. Koroze kovů

Koroze kovů je způsobena jejich oxidací vlivem látek z okolního prostředí. Největší vliv, který způsobuje korozi oceli, má vlhkost okolního prostředí. Samotná koroze se dělí podle několika hledisek. Jednou ze základních možností dělení je podle typu děje nebo podle formy projevů koroze.

### 2.1. Dělení koroze podle typu děje

#### 2.1.1. Chemická koroze

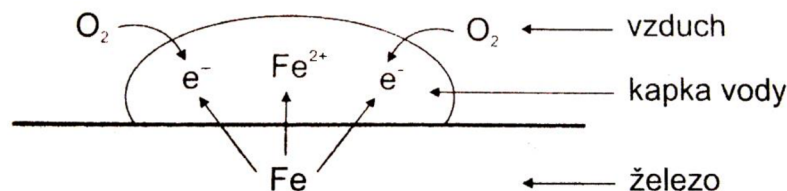
Tento druh koroze je způsoben chemickými látkami, které přichází do styku s kovem. Tyto látky mohou být v roztocích i plynech. Do chemické koroze také patří působení roztoků hydroxidů na amfoterní kovy (např. zinek nebo hliník), u kterých dochází k jejich postupnému rozpouštění a vytváření aniontových struktur. [7]

Plynné látky způsobující korozi jsou, buď oxidačního, nebo redukčního charakteru. Oxidující látky působí na povrchu a převádí kov do vyššího oxidačního stavu a redukční plyny, jako je například vodík, se v kovech rozpouští a způsobují její křehnutí. [7]

#### 2.1.2. Elektrochemická koroze

Při rozdílném potenciálu styku dvou různých kovů se tvoří lokální elektrické články. Kovy se oxidují vlivem např. vzdušného kyslíku, vlhkosti nebo kyselinotvorných oxidů.

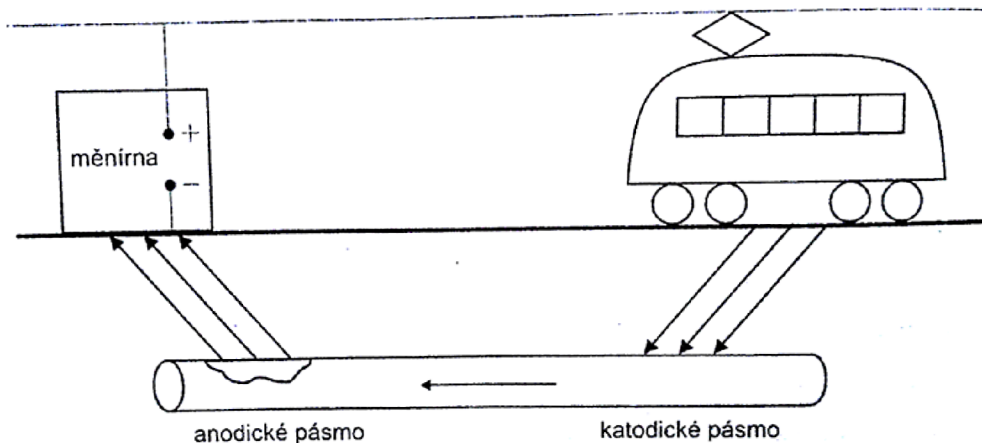
Průběh koroze železa je vidět na obr. 2.1. Na povrchu železa je kapka vody, v ní se rozpustí molekula kyslíku a proběhne redukce kyslíku na vodu (tzv. poloreakce). Vzniká tím lokální katoda a anoda. Do katody jsou dodány elektrony z poloreakce, jež proběhla na anodě. Ve vodě vznikne galvanický článek, který zodpovídá za samotnou korozi. [7]



Obr. 2.1: Schéma elektrochemické koroze železa [7]

#### 2.1.3. Koroze bludnými proudy

Tento druh koroze se vyskytuje na výztuži železobetonových konstrukcí v blízkosti drah se stejnosměrným proudem. U kolejí, které se používají jako zpětné vodiče, může dojít k přechodu proudu do okolí v případě, kdy se prostředí chová jako elektrolyt. Proud pak přechází do výztuže, při vstupu tvoří katodovou reakci a v místě návratu anodickou reakci (tzv. rozpouštění kovu). [7]



Obr. 2.2: Schéma koroze bludnými proudy [7]

## 2.2. Dělení podle formy znehodnocení

### 2.2.1. Rovnoměrné formy

Rovnoměrná koroze kovů probíhá zpravidla shodnou rychlostí na celém povrchu. Tato forma je velmi rozšířená ať už jde např. o působení atmosférických vlivů, vody nebo třeba roztoků kyselin. Na počátku vzniká jako koroze skvrnitá a rovnoměrnou formu nabyde až po delší době ustáleného procesu. [8]

Kvantifikovat můžeme korozi dvěma způsoby: hmotnostním úbytkem nebo rozměrovým úbytkem.



Obr. 2.3: Rovnoměrná koroze [8]

### 2.2.2. Nerovnoměrné formy

Za hlavní se považuje ta forma, která významnějším způsobem ovlivňuje technické požadavky. Nehledí se tedy na to, která forma zkoroduje největší množství kovu. [8]

#### Skvrnité napadení

Příčinou této formy koroze je zvýšení lokální korozní aktivity tvořící epicentrum korozního procesu. Touto formou napadení trpí kovy převážně z počátku korozní expozice. V průběhu pak přechází na jiné formy napadení. [8]

#### Důlkové napadení

Stejně jako skvrnité napadení je důlkové napadení způsobeno zvýšením lokální korozní aktivity tvořící epicentrum korozního procesu. Oproti předchozímu případu však proniká při důlkové korozi napadení do větší hloubky. [8]

## Bodové napadení

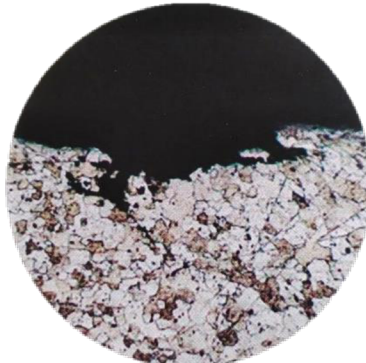
Oproti předchozím formám se bodové napadení liší rozměrovými parametry. Rozlišení mezi bodovým a důlkovým napadením se provádí porovnáním hloubky průniku korozního napadení  $P_n$  a průměrem bodu nebo důlku  $D_n$ . Pokud  $P_n < D_n$  jedná se o důlkové napadení a v případě že  $D_n < P_n$  je napadení bodové. [8]

## Štěrbínové napadení

Štěrbínové napadení je zvláštním případem, který vzniká, pokud je mezi plochami dvou kovů úzká štěrbina. Ta je příčinou nerovnoměrného provzdušnění a vzniku korozního napadení. [8]



a) Skvmité napadení



b) Důlkové napadení



c) Bodové napadení



d) Štěrbínové napadení

Obr. 2.4: Nerovnoměrné formy koroze [8]

### 2.2.3. Strukturní formy

#### Mezikrystalová koroze

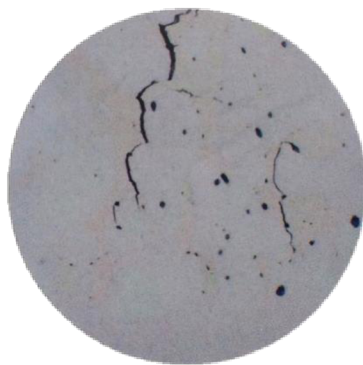
Nejčastěji se nachází u výrobků, u kterých došlo vlivem teplot ke změnám struktury na hranici zrn (např. svařování). Koroze vzniká podél rozhraní zrn do značné hloubky, tím se porušuje soudržnost a materiál ztrácí mechanické vlastnosti. [8]

#### Transkrystalová koroze

Oproti mezikrystalové korozi probíhá transkrystalová koroze napříč zrny. Pokud je tento proces spojen s mechanickým namáháním, vzniká transkrystalové korozní praskání. [8]

#### Korozní únava

Tato forma vzniká při současném působení korozního a dynamického namáhání. Dochází tím k podstatnému snížení meze únavy. V materiálu probíhá mechanická degradace, která s korozní interakcí vede k rozvoji trhlin v materiálu. [8]



a) Mezikrystalová koroze



b) Transkrystalová koroze



c) Korozní únava

Obr. 2.5: Strukturní formy koroze [8]

### 3. Řízená koroze

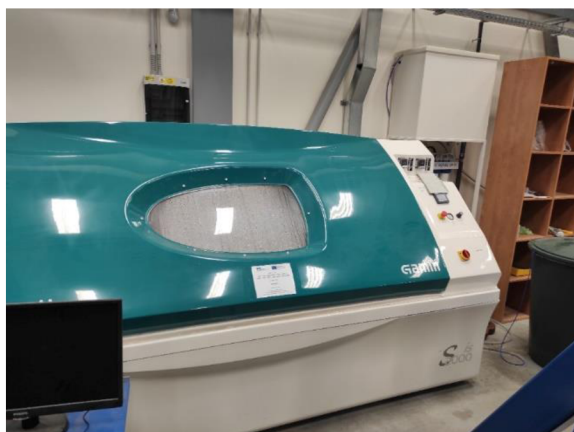
Koroze ocelí testovaných vzorků byla řízená a byla rozdělena na čtyři způsoby provádění pro různé míry degradace. Ve třech případech byl použit způsob koroze v umělých atmosférách [9].

Při tomto způsobu, byly ocelové vzorky umístěny do uzavřené komory (viz obr. 3.1 a obr. 3.2), kde na ně následně byl rozprášen 5% roztok chloridu sodného. Konce vzorků se závity byly zajištěny ochrannou fólií, aby nedošlo k jejich poškození. To by totiž mohlo mít za následek znemožnění upnutí do zkušebního stroje, a tedy i odzkoušení samotného vzorku.

Rozdíly mezi jednotlivými způsoby koroze byly v délce, po kterou byly vzorky v komoře účinkům solné mlhy vystaveny. Při prvním způsobu byla délka testu 3 dny a teplota v komoře 35°C. Druhý způsob trval dvojnásobnou dobu tedy 6 dní se stejnou teplotou 35 °C. Poslední způsob trval v součtu 9 dní, kdy prvních 6 dní byla teplota v komoře 35 °C a následně pro zbývající 3 dny byla teplota navýšena na 50 °C.

Čtvrtý způsob degradace spočíval v ponechání ocelových vzorků na střeše, kde byly vystaveny běžným vlivům počasí. V tomto prostředí byly vzorky ponechány bez jakéhokoliv ošetření po dobu jednoho roku. Díky tomuto způsobu degradace jsme následně schopni ve výsledcích předpokládat, jaké době, vystavené v exteriéru, by mohli odpovídat zbylé způsoby prováděné v komoře.

Před následnými únavovými zkouškami, byly ze vzorků odstraněny ochranné fólie a jejich povrch byl očištěn od zbytků, které by mohli i nadále podporovat další korozní degradaci.



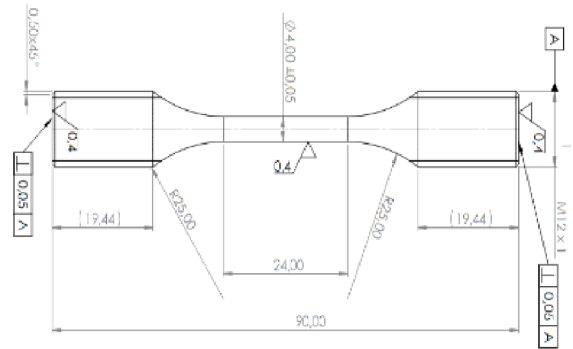
Obr. 3.1: Fotografie korozní komory



Obr. 3.2: Fotografie umístění vzorků v komoře



Obr. 3.3: Fotografie detailu uložení vzorků vystavených korozi



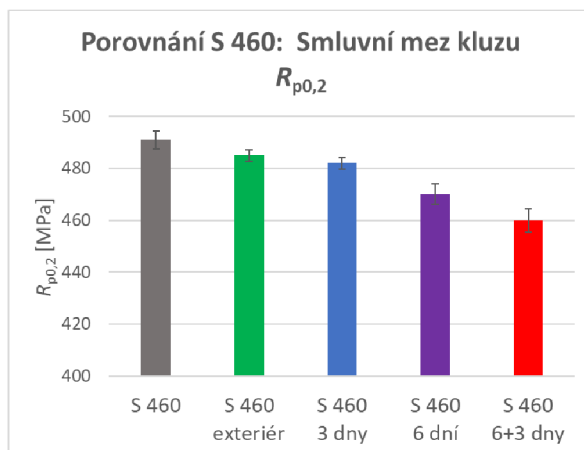
Obr. 3.4: Rozměry a geometrie ocelových vzorků vystavených korozi a únavovým zkouškám

### 3.1. Tahové zkoušky korodovaných ocelí

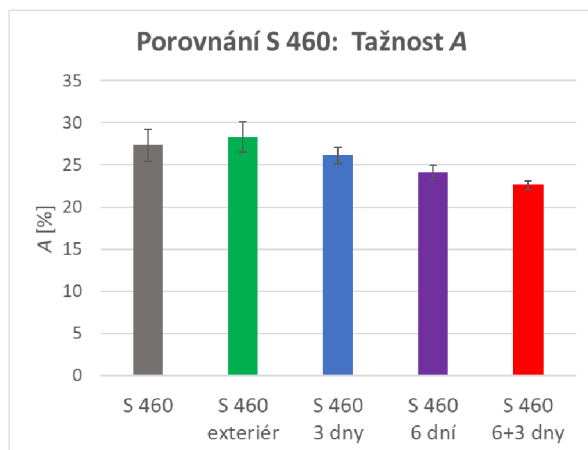
Tahové zkoušky korodovaných ocelí byly provedeny stejně jako u ocelí nekorodovaných. Pro všechny způsoby koroze byly zkoušeny dva až tři vzorky. Průměrné hodnoty výsledků jsou vypsány v tabulkách níže a porovnány s hodnotami referenčních ocelí z kapitoly 1.3 ve formě grafů (obr. 3.5 až 3.10). Všechny výsledky ze zkoušek stejně tak jako tahové diagramy jsou zaznamenány v příloze 1.

Tab. 3.1: Průměrné hodnoty z tahových zkoušek korodovaných vzorků oceli S 460

S 460 $\bar{x}$	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	$A$ [%]
exteriér	485	617	14,88	28,3
3 dny	482	612	13,90	26,1
6 dní	470	605	13,68	24,1
6+3 dny	460	594	12,90	22,6



Obr. 3.5: Graf porovnání smluvních mezí kluzu oceli S 460 v závislosti na druhu koroze

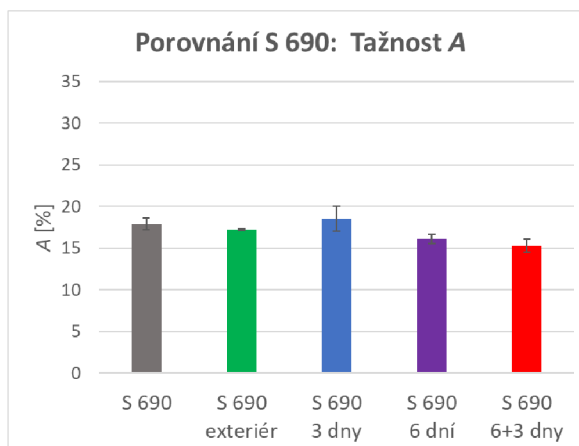
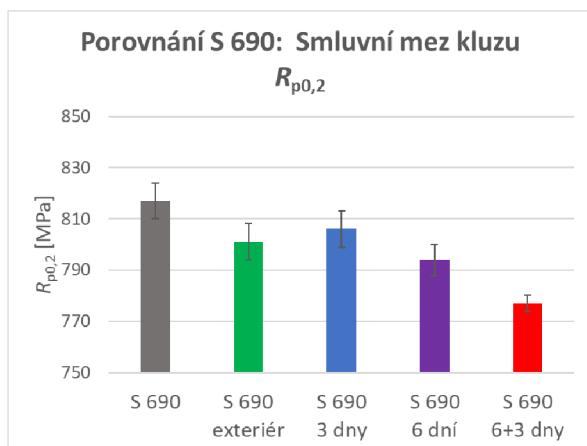


Obr. 3.6: Graf porovnání tažnosti oceli S 460 v závislosti na druhu koroze



Tab. 3.2: Průměrné hodnoty z tahových zkoušek korodovaných vzorků oceli S 690

S 690 $\bar{x}$	$R_{p0,2}$	$R_m$	$A_g$	$A$
	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
exteriér	801	858	5,32	17,2
3 dny	806	862	5,45	18,5
6 dní	794	849	5,01	16,1
6+3 dny	777	830	4,54	15,3

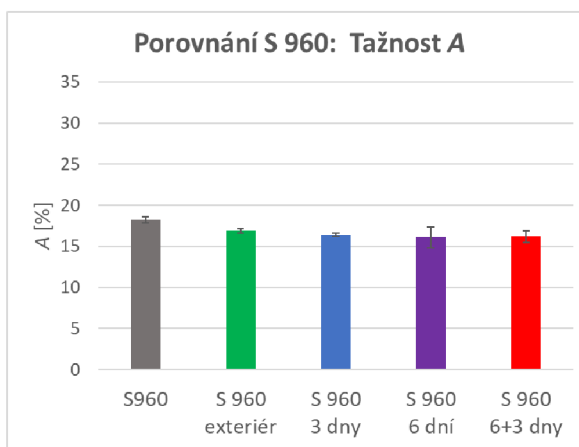
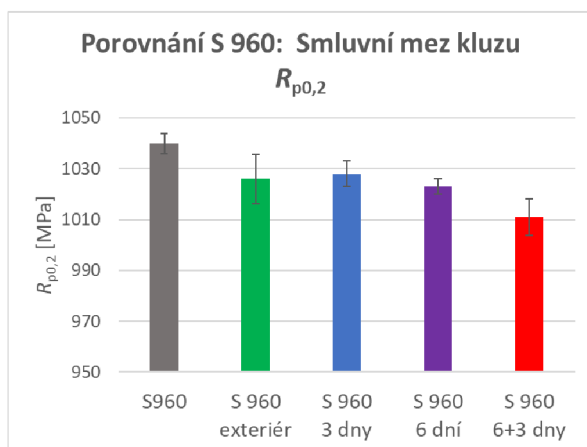


Obr. 3.7: Graf porovnání smluvních mezí kluzu oceli S 690 v závislosti na druhu koroze

Obr. 3.8: Graf porovnání tažnosti oceli S 690 v závislosti na druhu koroze

Tab. 3.3: Průměrné hodnoty z tahových zkoušek korodovaných vzorků oceli S 960

S 960 $\bar{x}$	$R_{p0,2}$	$R_m$	$A_g$	$A$
	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
exteriér	1026	1066	5,69	16,9
3 dny	1028	1068	5,47	16,4
6 dní	1023	1062	5,60	16,1
6+3 dny	1011	1048	5,34	16,2



Obr. 3.9: Graf porovnání smluvních mezí kluzu oceli S 960 v závislosti na druhu koroze

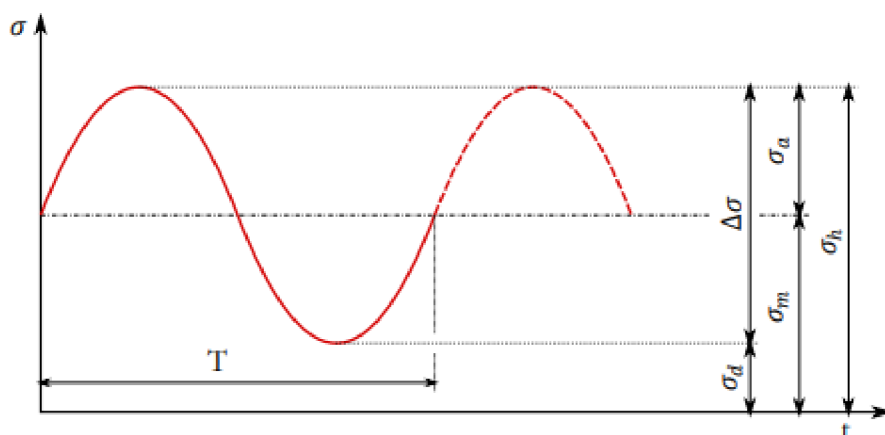
Obr. 3.10: Graf porovnání tažnosti oceli S 960 v závislosti na druhu koroze

## 4. Únava

### 4.1. Parametry cyklického zatěžování

Během cyklického zatěžování dochází ke dvěma druhům deformací. Pružná neboli elastická deformace není problematická, protože po odtížení tato deformace zmizí. Deformace, která je však pro nás důležitá, je deformace plastická. Tato složka způsobuje nevratné změny i po odtížení a při opakovaném zatěžování dochází ke kumulaci těchto deformací, které následně způsobují tvorbu trhlin a snižují únosnost konstrukce. [10, 11]

Pro zkoušky v laboratoři se místo nahodilého cyklického zatížení, které by odpovídalo reálnému prostředí, používá zjednodušení ve formě pravidelného zatěžování ve tvaru sinusoidy obr. 4.1. Tvar zatěžování může být i například trojúhelníkový nebo čtvercový, ty však nejsou tolik časté. [12]



Obr. 4.1: Schéma sinusové amplitudy napětí [13]

Rychlost zatěžování se odvíjí od frekvence  $f$ , neboli počtu opakování za určitý časový úsek a její základní jednotkou jsou Hz. Její výpočet pomocí vzorce (9) obsahuje veličinu periody  $T$ , která udává dobu, po kterou trvá opakování jednoho periodického děje se základní jednotkou v sekundách.

$$f = \frac{1}{T} . \quad (9)$$

Ze schématu amplitudy napětí na obr. 4.1 je vidět, že sinusový průběh je definován horní hranicí napětí  $\sigma_h$  a dolní hranicí napětí  $\sigma_d$ . Od těchto hodnot se mohou počítat další charakteristiky zatěžování.

Střední napětí neboli statická složka zátěžového cyklu:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h + \sigma_d}{2} . \quad (10)$$

Amplituda napětí neboli dynamická složka zátěžového cyklu:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_h - \sigma_d}{2} . \quad (11)$$

Rozkmit napětí:

$$\Delta\sigma = 2\sigma_a = \sigma_h - \sigma_d . \quad (12)$$

Pro symetrické zatěžování vychází střední napětí rovno nule. V případě, kdy se střední napětí nule nerovná, jedná se o zatěžování asymetrické a pro jeho popsání byly zavedeny následující parametry  $R$  a  $P$ .

Napětový součinitel:

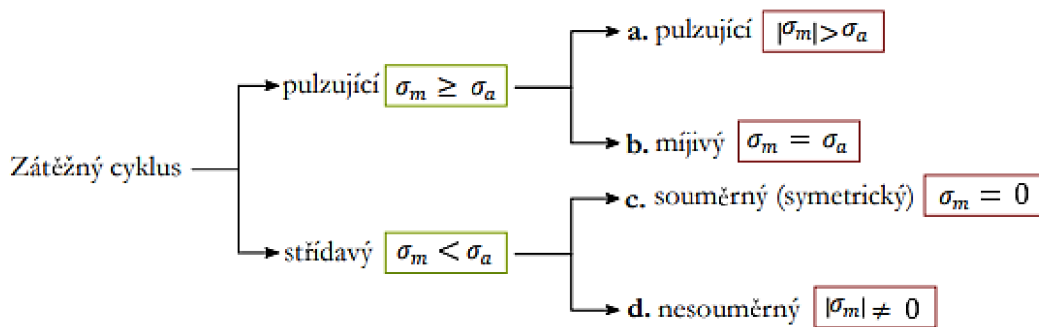
$$R = \frac{\sigma_d}{\sigma_h} \quad (13)$$

Amplitudový součinitel, lze vypočítat dvěma způsoby:

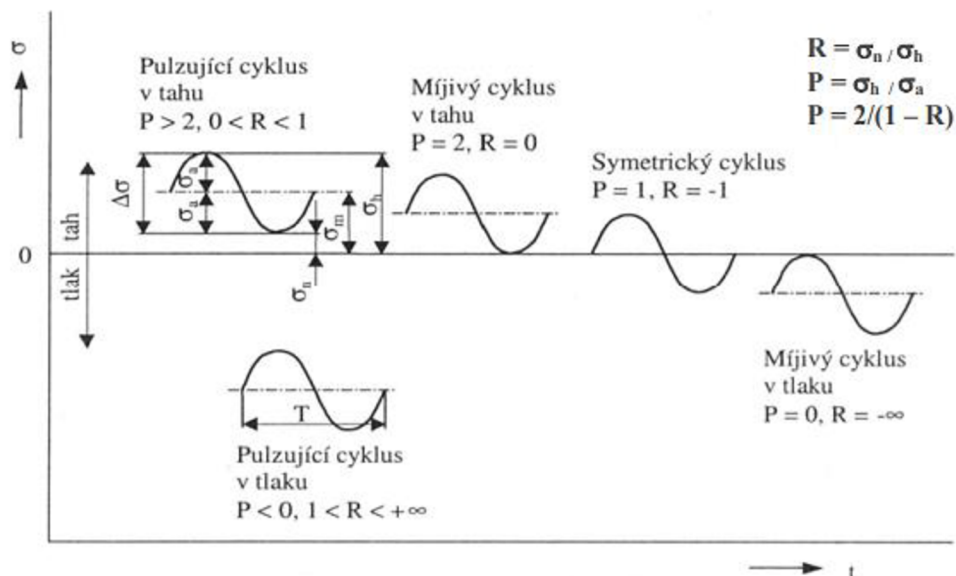
$$P = \frac{\sigma_h}{\sigma_a} \quad (14)$$

$$\text{Alt.: } P = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (15)$$

Asymetrické zatěžování se dá dělit na pulzující a střídavé. Podmínky, podle kterých se zatěžování rozděluje, jsou přehledně zobrazeny na schématu viz obr. 4.2. Dále je na obr. 4.3 graf závislosti napětí na čase, na kterém jsou umístěny sinusoidy zatěžování vzhledem k výsledným napětovým a amplitudovým součinitelům.



Obr. 4.2: Rozdělení zátěžných cyklů [13]

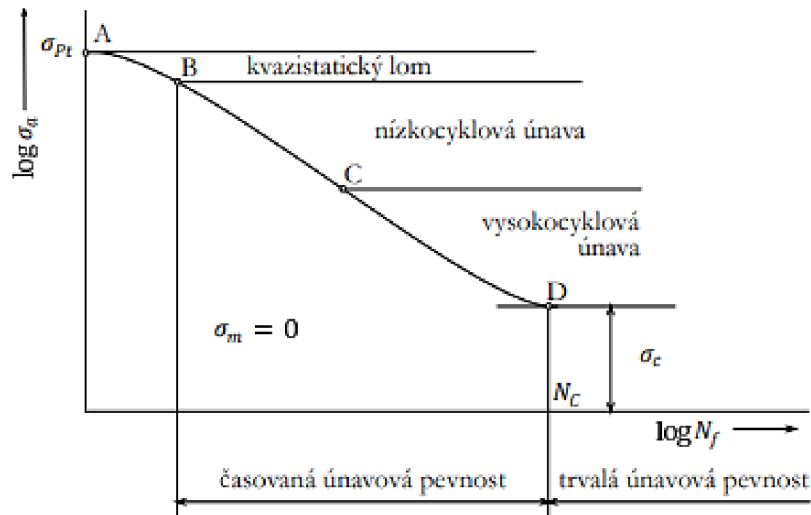


Obr. 4.3: Různé typy sinusových zátěžných cyklů [14]

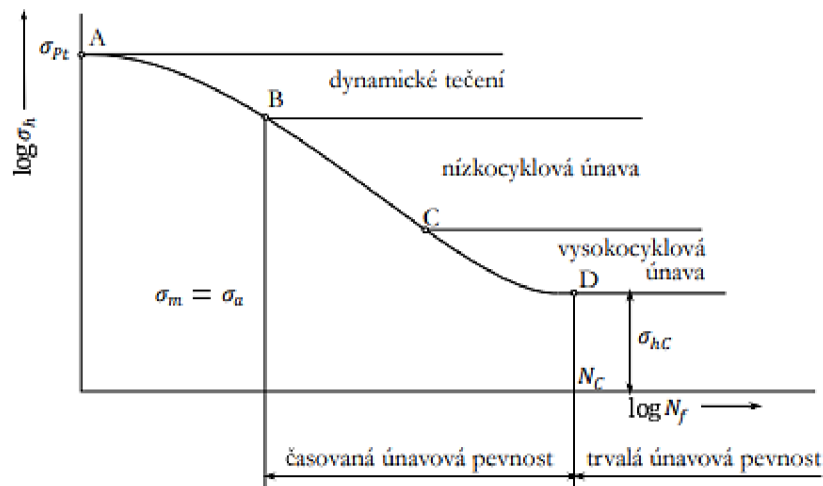
## 4.2. Křivky životnosti

Pro popis únavového chování se používá Wöhlerova křivka neboli také  $S-N$  křivka, která popisuje závislost amplitudy napětí  $\sigma_a$  na počtu cyklů do lomu  $N_f$ . Zpravidla se zkoušky provádějí buď na symetricky zatížený cyklus ( $\sigma_m = 0$ ) nebo na míjivý cyklus ( $\sigma_m = \sigma_a$ ). [14]

Vždy platí, že s klesajícím napětím narůstá počet cyklů do lomu. Místo, kde již nedochází k porušení vzorku, označujeme  $N_c$  a je to zároveň hranice, kde končí oblast časované únavové pevnosti a začíná oblast trvalé únavové pevnosti (viz obr. 4.4).



a) symetrický cyklus



b) nesymetrický cyklus

Obr. 4.4: Schéma průběhu křivky životnosti pro symetrický a nesymetrický cyklus zatěžování [13]

### 4.3. Únavové modely

#### 4.3.1. Basquinův model

Nejzákladnější model, který popisuje únavovou životnost je model Basquinův. Mnohé další modely se o d něj dále odvíjí, nebo z něj vychází. Je dán základní rovnicí: [15]

$$\sigma(N) = aN^b = a\left(\frac{1}{N}\right)^{-b}, \quad (16)$$

kde  $a$  udává hodnotu únavové pevnosti při jednom cyklu a  $b$  je exponent únavové pevnosti.

Graficky se výsledky většinou uvádí v log-log, případně semi-log měřítku, kdy jsou hodnoty buď jedné nebo obou os vyneseny logaritmicky. V případě, kdy je počet cyklů i amplituda napětí v logaritmickém tvaru, nabývá Basquinova křivka tvaru přímky a její rovnice se upraví:

$$\log(N) = A + B \log(\sigma), \quad (17)$$

$$\log(\sigma) = \frac{A}{B} + \frac{1}{B} \log(N), \quad (18)$$

kde  $A$  a  $B$  jsou lineární regresní parametry vycházející z parametrů  $a$  a  $b$ .

$$a = 10^A, \quad (19)$$

$$b = B. \quad (20)$$

Tento model má však své limity. Není vhodný pro popis nízkocyklové oblasti, kde se již model výrazně odchyluje od reálného chování materiálu. Dále tento model nepostihuje mez únavy materiálu, jelikož model není schopen sledovat trend směrem k nenulové horizontální mezi únavy, a tedy i v této oblasti dochází k odchýlení. Pokročilejší modely proto upravily rovnici, pro přesnější popis chování. [15]

Rovnice pro nízkocyklovou oblast:

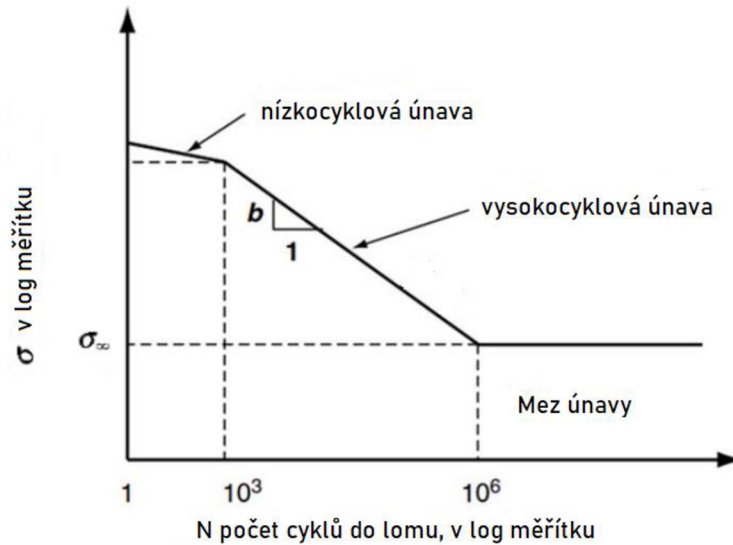
$$\sigma(N) = a(N + B)^b. \quad (21)$$

Rovnice pro vysokocyklovou oblast (Stromeyerova rovnice):

$$\sigma(N) = aN^b + \sigma_{\infty}, \quad (22)$$

kde  $\sigma_{\infty}$  je mez únavy materiálu, kdy při této amplitudě napětí již nedochází k porušení vzorku při jakkoli vysokém počtu cyklů.

Výsledný tvar modelu po úpravě nízkocyklové oblasti a po přidání meze únavy nabývá tvaru tri-lineárního diagramu a je zobrazen na obr. 4.5.



Obr. 4.5: Schématické znázornění upravené Basquinovy křivky v log-log měřítku [16]

#### 4.3.2. Kohoutův a Věchetův model

Jedná se o model, který vychází z Basquinova modelu, avšak oproti němu popisuje všechny režimy únavy, a to jak nízkocyklovou oblast, tak vysokocyklovou oblast a obsahuje v sobě i mez únavy materiálu. Model předpokládá esovitý tvar  $S-N$  křivky, která zahrnuje dvě horizontální asymptoty odpovídající horní a dolní hranici únavy.

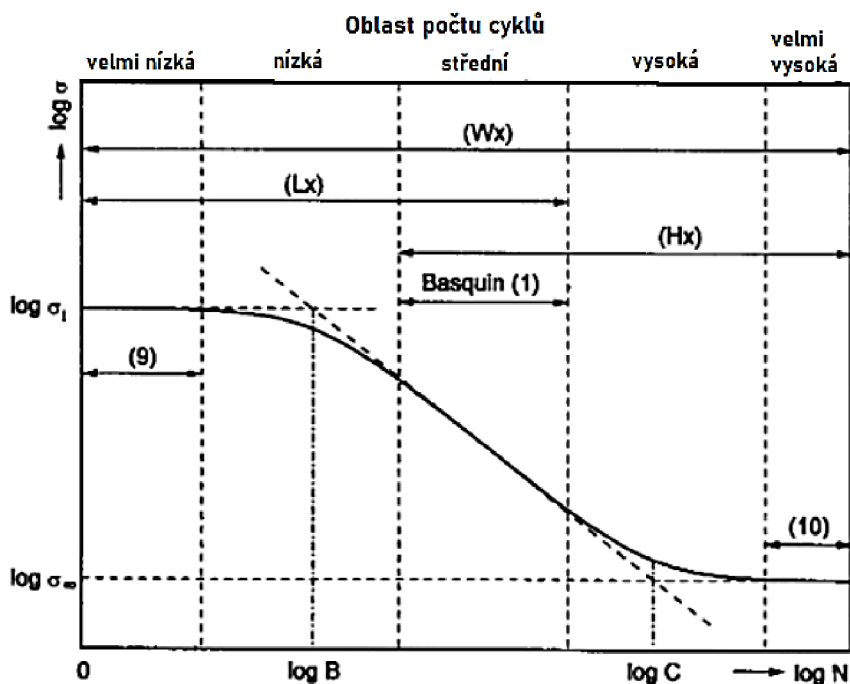
Rovnice, která popisuje celou oblast životnosti ( $W_x$ ), může být vypočtena více způsoby v závislosti na použitých parametrech: [15]

$$\sigma(N) = a \left( \frac{(N+B)C}{N+C} \right)^b = \sigma_{\infty} \left( \frac{N+B}{N+C} \right)^b = \sigma_1 \left( \frac{1+\frac{N}{B}}{1+\frac{N}{C}} \right)^b. \quad (23)$$

Parametry  $a$  a  $b$  jsou stejné, jako tomu bylo u Basquinova modelu, jsou však počítány pouze pro oblast střední ( $10^3-10^6$  cyklů). Podrobné rozdělení oblastí je rozepsáno v tab. 4.1 a graficky znázorněny spolu s křivkou Kohouta a Věcheta na obr. 4.6. [15]

Tab. 4.1: Tabulka typického rozsahu počtu  $N$ , pro jednotlivé oblasti [15]

Dělení oblastí únavových dat	Velmi nízká	Nízká	Střední	Vysoká	Velmi vysoká
Typický rozsah $N$ , počet cyklů	$1 < N < 10^2$	$10^2 < N < 10^3$	$10^3 < N < 10^6$	$10^6 < N < 10^8$	$10^8 < N < \infty$



Obr. 4.6: Grafické znázornění Kohout a Věchet křivky, v závislosti na oblasti počtu cyklů [15]

Jak je vidět z grafu na obr. 4.6, nemusí být počítána únavová křivka pro celou oblast životnosti (**Wx**). Lze také počítat pouze s omezenou oblastí nízkocyklovou (**Lx**) nebo naopak vysokocyklovou (**Hx**), kdy k výpočtu nepotřebujeme všechny parametry jako je tomu u výpočtu **Wx**. [15]

Zjednodušení pro nízkocyklovou oblast (**Lx**) používá do výpočtu pouze parametr amplitudy napětí při jednom cyklu ( $N = 1$ )  $\sigma_1$ .

$$\sigma(N) = \sigma_1 \left( \frac{N+B}{B} \right)^b. \quad (24)$$

Pro vysokocyklovou oblast (**Hx**) naopak využíváme pouze parametr trvalé meze únavy  $\sigma_\infty$ .

$$\sigma(N) = \sigma_\infty \left( \frac{N}{N+C} \right)^b. \quad (25)$$

### Parametry

Parametry  $B$  a  $C$  reprezentují místa, kde dochází ke změně křivosti.  $B$  je počet cyklů odpovídajících průsečíku tečny oblasti konečné životnosti a vodorovné asymptotě meze pevnosti v tahu ( $\sigma_1$ ).  $C$  udává počet cyklů odpovídající průsečíku tečny oblasti konečné životnosti a vodorovné asymptotě únavové meze ( $\sigma_\infty$ ). Jejich výpočet obsahuje pomocné parametry  $\beta$  a  $\Upsilon$ . [15]

$$B = \beta C, \quad (26) \quad C = 10^7 \frac{1-\Upsilon}{\Upsilon-\beta}, \quad (27)$$

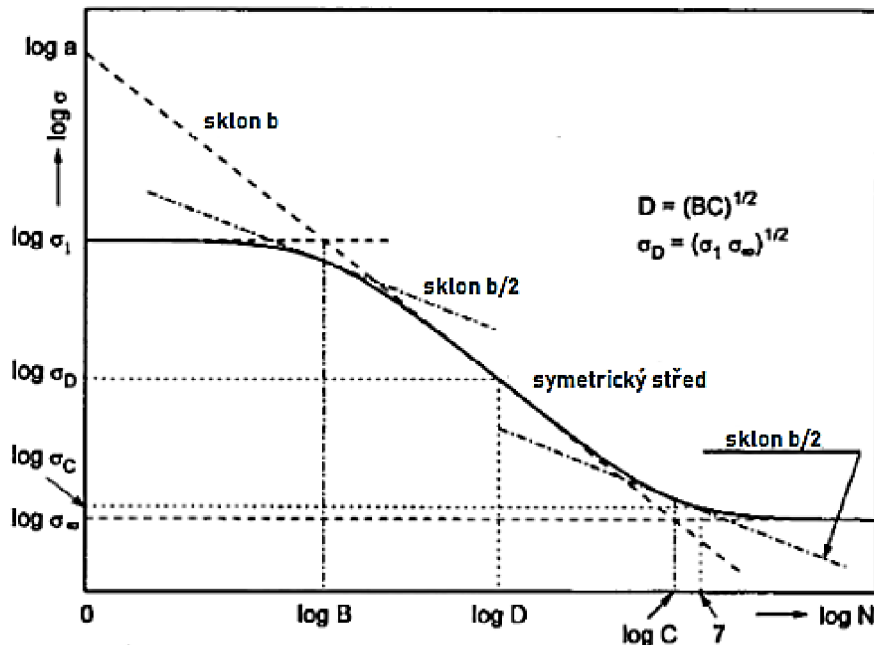
$$\beta = \left( \frac{\sigma_1}{\sigma} \right)^{1/b}, \quad (28) \quad \Upsilon = \left( \frac{\sigma_c}{\sigma} \right)^{1/b}. \quad (29)$$

Kromě únavové meze  $\sigma_\infty$  se ve výpočtech vyskytuje i smluvní mez únavy  $\sigma_c$  viz obr. 4.7, pro předem definovaný počet cyklů.

Kohoutův a Věchetův předpoklad únavového chování pracuje se symetričností modelu kolem inflexního bodu  $D$ , který lze také vidět na obr. 4.7. Pro jeho výpočet slouží dvě rovnice:

$$D = \sqrt{BC}, \quad (30)$$

$$\sigma_D = \sqrt{\sigma_1 \sigma_\infty}. \quad (31)$$



Obr. 4.7: Grafické znázornění parametrů křivky [15]

### 4.3.3. Castillo–Canteli model

Modely Castilla–Canteliho jsou podloženy jak fyzikálními, tak i statistickými předpoklady a vedou tedy k pravděpodobnostním polím tzv.  $P-S-N$ , pokud se jedná o napětí nebo  $P-E-N$ , pokud se jedná o deformace. [17]

Zcela obecný zápis:

$$\psi = q(N_f), \quad (32)$$

kde  $\psi$  představuje parametr únavového poškození (napětí  $\sigma$  nebo deformaci  $\varepsilon$ ) a  $q$  je klesající funkce celkové životnosti k počtu cyklů do selhání  $N_f$ . [18]

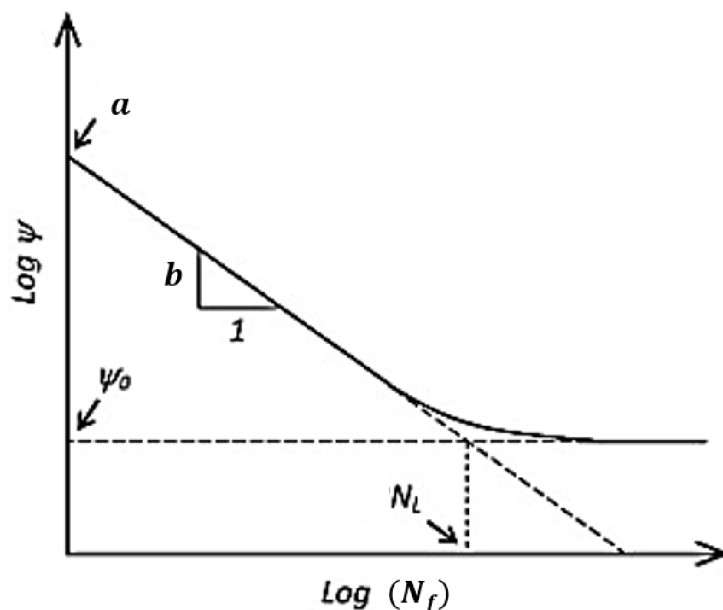
Po rozepsání jako mocninou funkci nabyde rovnice tvaru:

$$\psi = a(2N)^b + \psi_o, \quad (33)$$

kde  $a$  a  $b$  jsou materiálové konstanty obdobně jako tomu bylo u Basquinových modelů a  $\psi_o$  je limit únavy.

Schéma takového modelu včetně zobrazení parametrů vyskytujících se v rovnici je patrné na obr. 4.8.





Obr. 4.8: Schematické znázornění modelu únavového selhání, zobrazující limit únavy [18]

Únavová odolnost, a tedy i únavové selhání, lze na základě obecného modelu definovat třemi proměnnými, a to parametrem únavy ( $\psi$ ), počtem cyklů do selhání ( $N$ ) a pravděpodobností ( $p$ ). Pokud do zobecněného pole pravděpodobnosti doplníme Weibulovy parametry ( $\lambda$ ,  $\beta$  a  $\delta$ ), které budeme podrobněji rozebírat dále, získáme tím rovnici: [18]

$$p = 1 - \exp \left\{ - \left[ \frac{\log(N/N_o) \log(\psi/\psi_o) - \lambda}{\delta} \right]^\beta \right\}. \quad (34)$$

S podmínkami:

$$\log(N/N_o) \log(\psi/\psi_o) \geq \lambda, \quad (35)$$

$$B = \log(N_o), \quad (36)$$

$$C = \log(\psi_o), \quad (37)$$

kde  $N_o$  představuje počet cyklů na začátku zatěžování, parametry  $\lambda$ ,  $\beta$  a  $\delta$  budou popsány dále.

Výhodou takto zobecněného modelu je, že se zabývá přímo celkovým poškozením, obsahuje tedy jak elastickou, tak plastickou složku, a především poskytuje pravděpodobnostní definici celého pole poškození a životnosti jako kvantilové křivky, uvádí tedy přímo pole pravděpodobnosti závislosti poškození na životnosti ( $p-\psi-N$ ). [18]

### Weibullovo rozdělení

Weibullovo rozdělení se používá k analýze mnoha různých materiálů. Je to metoda statistického modelování využívající metody matematické statistiky a teorie pravděpodobnosti, přičemž základní podstatou je využití vhodného teoretického rozdělení. [19]

Obecně se model používá k modelování bezporuchovosti. Ta se může hodnotit v různých jednotkách, například hodinách, dnech nebo cyklech. Samotné vyčíslení bezporuchovosti je možné provést pomocí vhodného parametru. K tomu, aby tento parametr bylo možné stanovit, potřebujeme vhodné teoretické rozdělení. To může být popsáno funkcí hustoty pravděpodobnosti, nebo distribuční funkcí, pokud jsou sledované veličiny spojité. [19, 20]

## Funkce hustoty pravděpodobnosti (PDF)

Funkce udává pravděpodobnost, že se porucha vyskytne do okamžiku  $x$ . Jestliže je  $f(x)$  funkce hustoty pravděpodobnosti pro spojitou náhodnou veličinu  $X$ , potom pravděpodobnost je spočtena integrací funkce PDF dané hodnoty nad uvedeným rozsahem (plocha ohraničená funkcí hustoty, vodorovnou osou a intervalem) viz obr. 4.9. [19, 20]

Pravděpodobnost:

$$P[a \leq X \leq b] = \int_a^b f(x) dx . \quad (38)$$

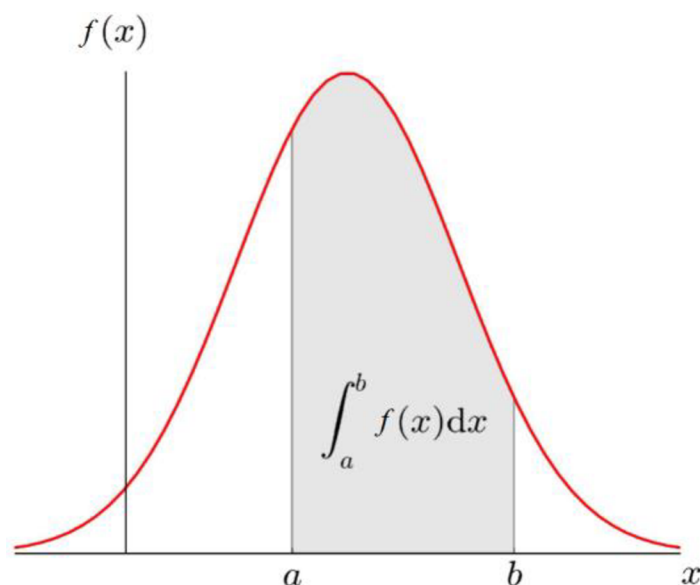
Funkce:

$$f(x) = \frac{\beta}{\delta} \left( \frac{x-\lambda}{\delta} \right)^{\beta-1} e^{-\left[ \frac{x-\lambda}{\delta} \right]^\beta} , \quad (39)$$

podmínky

$$f(x) \geq 0 , \quad (40)$$

$$\int_0^{+\infty} f(x) dx = 1 . \quad (41)$$



Obr. 4.9: Funkce hustoty pravděpodobnosti (PDF) s pravděpodobností nalezení hodnoty  $x$  v intervalu mezi  $a$  a  $b$  [19]

## Kumulativní distribuční funkce (CDF)

Můžeme ji definovat jako pravděpodobnost, že náhodná veličina (proměnná  $X$ ) nabude hodnoty menší (případně rovné) než určitá hodnota  $x$  (viz obr. 4.10).

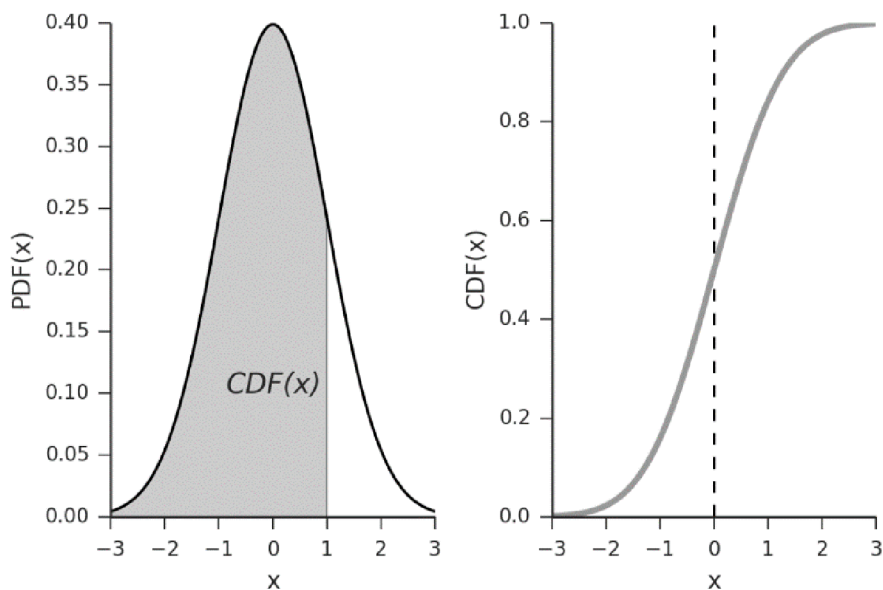
Distribuční funkce je neklesající a nabývá hodnot v intervalu od 0 do 1. Tyto hraniční hodnoty intervalu dostaneme při dosazení extrémních hodnot  $x$  (tzn.  $x = -\infty$  a  $x = +\infty$ ) za  $x_i$ . [19, 20]

Obecně:

$$F(x_i) = P(X < x_i) . \quad (42)$$

CDF Weibull:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-\lambda}{\delta}\right)^\beta} . \quad (43)$$

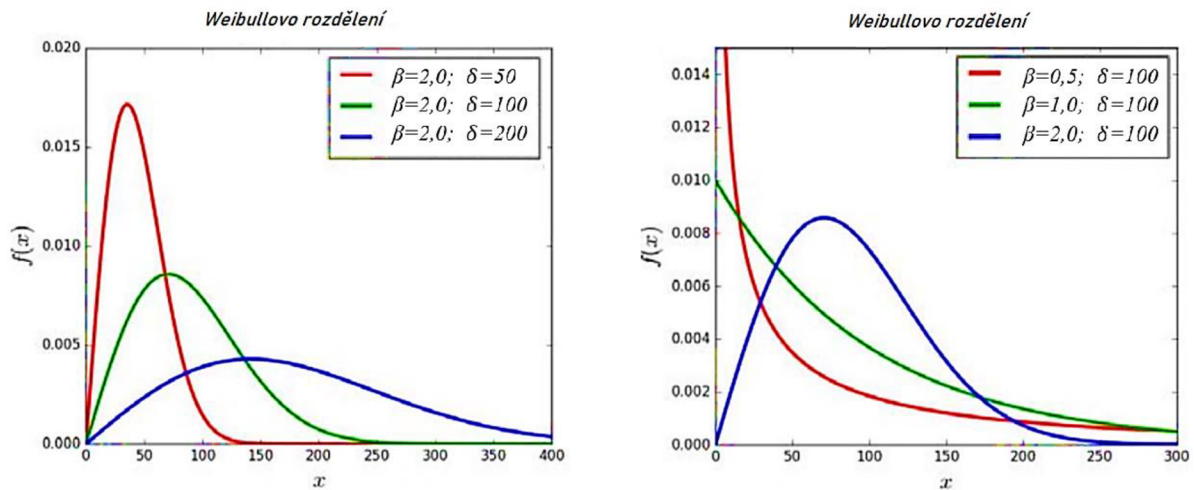


Obr. 4.10: Funkce hustoty pravděpodobnosti (vlevo) kumulativní rozdělení (vpravo) [19]

### Parametry

Weibullovo rozdělení může v závislosti na parametru  $\lambda$  být buď dvouparametrové (2-P), v případě, že  $\lambda = 0$  nebo tříparametrové, pokud  $\lambda$  nabývá hodnot rozdílných od 0.

Parametr  $\beta$  je parametr tvaru,  $\delta$  je parametr měřítka a  $\lambda$  je parametr polohy, definující polohu křivky nulového percentilu. Běžně je Weibullův tvarový parametr  $\beta$  považován za Weibullův sklon. Je tomu tak proto, že hodnota  $\beta$  se rovná sklonu přímky na pravděpodobnostní křivce. Vzájemné závislosti parametrů  $\beta$  a  $\delta$  jsou vidět na obr.4.11. [21]



Obr. 4.11: Vliv parametru měřítka  $\delta$  a vliv parametru tvaru  $\beta$  na tvar křivky [21]

### Pravděpodobnostní model Castilla–Canteliho podle Weibullova rozdělení

Pokud tedy do modelu Castilla–Canteliho dosadíme parametry Weibullova rozdělení a budeme počítat s napětím výsledný vzorec vypadá takto:

$$Pf(N, \Delta\sigma) = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{(\log N - B)(\log \Delta\sigma - C) - \lambda}{\delta}\right]^\beta\right\}, \quad (44)$$

s podmínkou

$$(\log N - B)(\log \Delta\sigma - C) \geq \lambda. \quad (45)$$

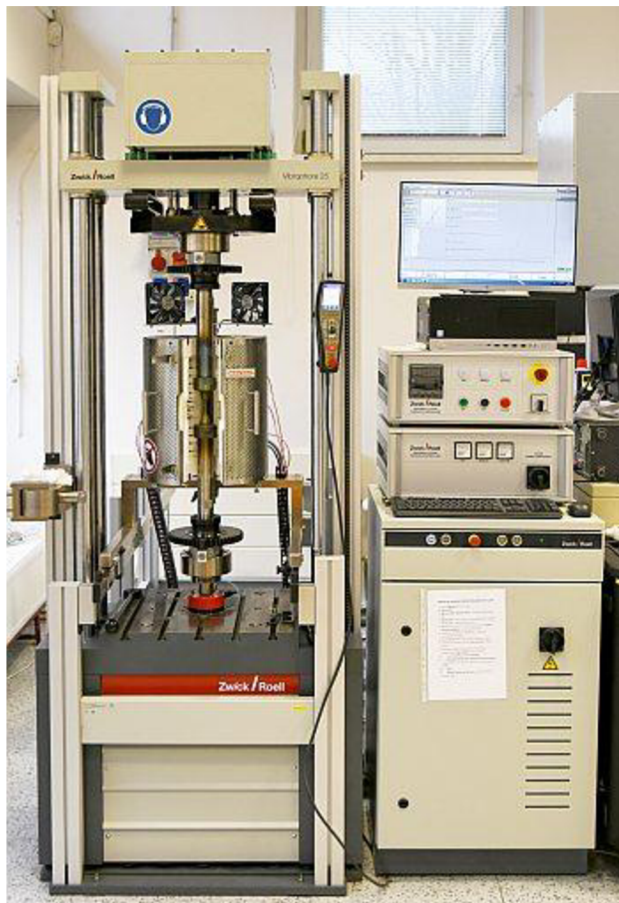
V této práci jsou parametry modelů Castilla–Canteliho, pravděpodobnostní rozdělení a kumulativní distribuční funkce počítány pomocí programu ProFatigue 2014 [22, 23, 24].

## 5. Únavové zkoušky testovaných ocelí

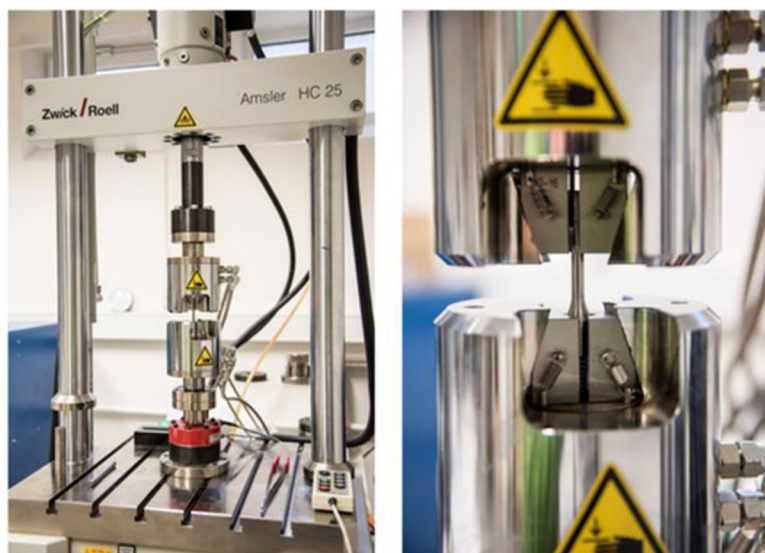
Poté, co byly vzorky vyjmuty z komory, zbaveny ochranné fólie a ošetřeny (viz obr. 5.1 vpravo), začalo testování vzorků na únavovou odolnost. Únavové zkoušky byly prováděny jak na referenčních vzorcích, které korozi nebyly vystaveny, tak i na všech degradovaných vzorcích.

Zatěžování probíhalo na rezonančním pulsátoru ZwickRoell Vibrophore (viz obr. 5.1 a 5.2), kde byly vzorky namáhány tahem. Napěťový součinitel byl stanoven na  $R = 0,1$  tedy se jednalo o pulzující cyklické tahové namáhání. Frekvence, ve kterých přístroj prováděl zatěžování, se pohybovaly mezi 70 až 110 Hz.

Smluvní mez únavy všech zkoušených vzorků, byla stanovena na  $10^7$  cyklů. Pokud u vzorku nedošlo k přetržení, po dosažení této hranice, zatěžování se zastavilo a vzorek se označil jako neporušený.



Obr. 5.1: Fotografie rezonančního pulsátoru ZwickRoell Vibrophore (vlevo) [25] a fotografie ocelových vzorků připravených na únavové testování (vpravo)



Obr. 5.2: Bližší fotografie rezonančního pulsátoru ZwickRoell Vibrophore (vlevo) a detail upnutí ocelového vzorku do přístroje (vpravo)

Z naměřených dat byly následně vypočítány únavové modely, vystihující únavové chování pozorovaných ocelí. Použit byl model Basquinův, model Kohouta a Věcheta a model Castilla–Canteliho. Pro všechny tyto modely byl také vždy spočítán koeficient determinace  $R^2$ , podle vzorce (46).

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (46)$$

Při výpočtu Basquinových modelů bylo pracováno pouze s daty vzorků, které byly porušeny. Tato křivka nepostihuje oblast meze únavy materiálu, a proto se při jejím modelování data se smluvní mezí únavy nepoužívají. Stejně tak i koeficienty determinací Basquinových modelů jsou počítány pouze z dat porušených vzorků.

V modelech Castilla–Canteliho jsou obsažena data ze všech odzkoušených vzorků porušených i neporušených. Výpovědní hodnota těchto modelů je však až ve vyšších řádech počtu cyklů, model není vhodný pro popis nízkocyklové únavy, proto byly koeficienty determinací u těchto modelů počítány až od hranice 50 000 cyklů.

Modely Kohouta a Věcheta (v grafech popsány zkratkou K–V) byly také počítány ze všech dat odzkoušených vzorků. Díky schopnostem modelu popisovat únavové chování, jak nízkocyklové, tak vysokocyklové únavy, byl zaznamenán koeficient determinace pro všechny vzorky porušené i neporušené, a navíc pro možnost srovnání modelů Kohouta a Věcheta a Castilla–Canteliho vypočítán i  $R^2$  pro vzorky, které dosáhly pouze více než 50 000 cyklů.

V následujících kapitolách 5.1 až 5.3 jsou uvedeny tabulky výsledných parametrů všech ocelí doplněné o koeficienty determinací a grafické znázornění křivek výše uvedených modelů. Data z únavových zkoušek jsou uvedena v příloze 2.

## 5.1. Únavové modely S 460

Tab. 5.1: Parametry pro Basquinův model vzorků oceli S 460

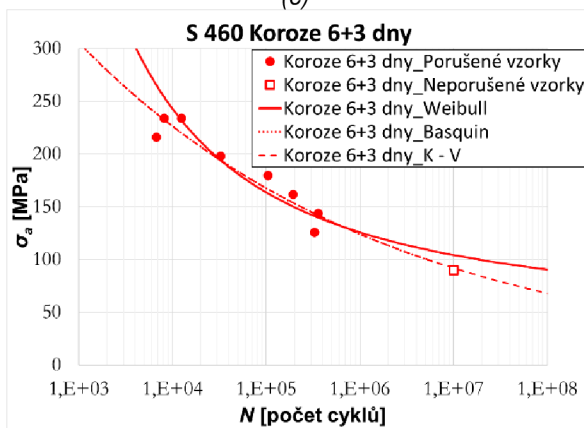
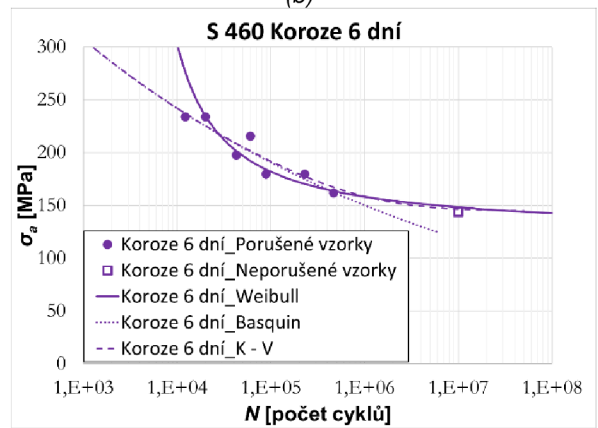
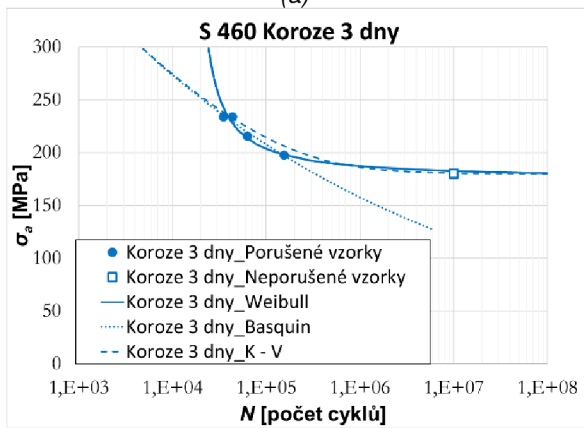
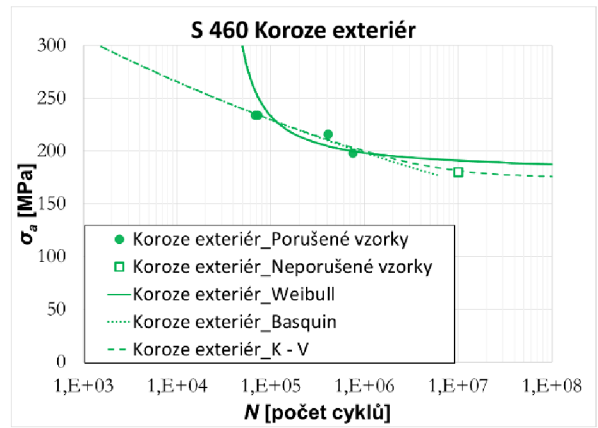
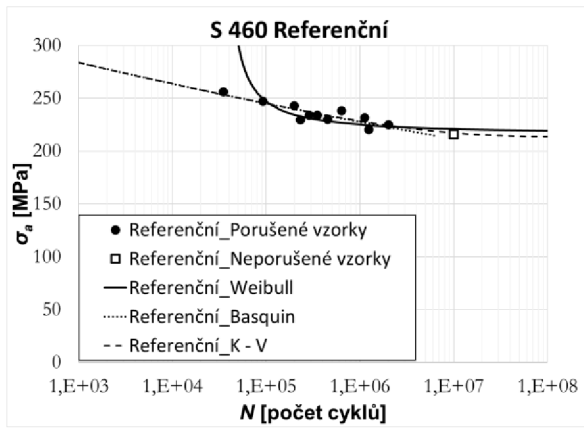
	Referenční	Exteriér	3 dny	6 dní	6+3 dny
<b>a</b>	284,3	476,1	820,7	627,8	752,6
<b>b</b>	-0,0133	-0,0633	-0,1194	-0,1035	-0,1304
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,306</b>	<b>0,950</b>	<b>0,958</b>	<b>0,841</b>	<b>0,939</b>

Tab. 5.2: Parametry pro Weibullův model vzorků oceli S 460

	Referenční	Exteriér	3 dny	6 dní	6+3 dny
<b>B</b>	10,35	10,09	9,52	7,48	0,00
<b>C</b>	5,37	5,19	5,16	4,82	3,52
<b>β</b>	2,33	3,48	11,48	2,01	8,66
<b>δ</b>	0,19	0,37	0,22	0,49	7,45
<b>λ</b>	0	0,04	0,1	1,14	11,03
<b>σ<sub>∞</sub> [MPa]</b>	215	180	174	124	34
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,600</b>	<b>0,504</b>	<b>0,974</b>	<b>0,838</b>	<b>0,920</b>

Tab. 5.3: Parametry pro Kohoutův a Věchetův model vzorků oceli S 460

	Referenční	Exteriér	3 dny	6 dní	6+3 dny
<b>a</b>	354,1	476,1	820,7	627,8	752,6
<b>b</b>	-0,03195	-0,06332	-0,11937	-0,10351	-0,13041
<b>C</b>	7,95×10 <sup>6</sup>	4,26×10 <sup>6</sup>	3,32×10 <sup>5</sup>	1,44×10 <sup>6</sup>	2,19×10 <sup>10</sup>
<b>γ</b>	0,55712	0,70125	0,96788	0,87362	0,4558×10 <sup>-3</sup>
<b>σ<sub>c</sub> [MPa]</b>	216	180	180	144	90
<b>σ<sub>∞</sub> [MPa]</b>	212	176	179,3	142	33
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,797</b>	<b>0,959</b>	<b>0,890</b>	<b>0,896</b>	<b>0,950</b>
<i>(pro N &lt; 50 000)</i>					
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,860</b>	<b>0,959</b>	<b>0,927</b>	<b>0,914</b>	<b>0,936</b>



Obr. 5.3: Grafické znázornění únavového chování oceli S 460 Basquinovým modelem, modelem Kohouta a Věcheta a Weibullovým modelem. Graf referenční oceli (a), korozie v exteriéru (b), 3 dny (c), 6 dní (d) a 6+3 dny (e).



## 5.2. Únavové modely S 690

Tab. 5.4: Parametry pro Basquinův model vzorků oceli S 690

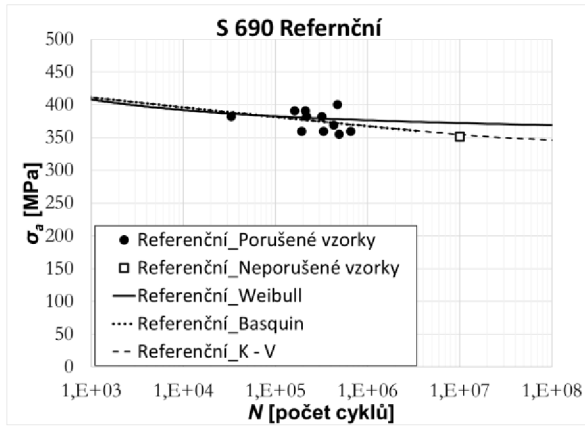
	Referenční	Exteriér	3 dny	6 dní	6+3 dny
<b><i>a</i></b>	420	3211	2112	1327	1918
<b><i>b</i></b>	-0,0079	-0,2086	-0,1666	-0,1312	-0,1658
<b><i>R</i><sup>2</sup></b>	<b>0,006</b>	<b>0,932</b>	<b>0,776</b>	<b>0,913</b>	<b>0,890</b>

Tab. 5.5: Parametry pro Weibullův model vzorků oceli S 690

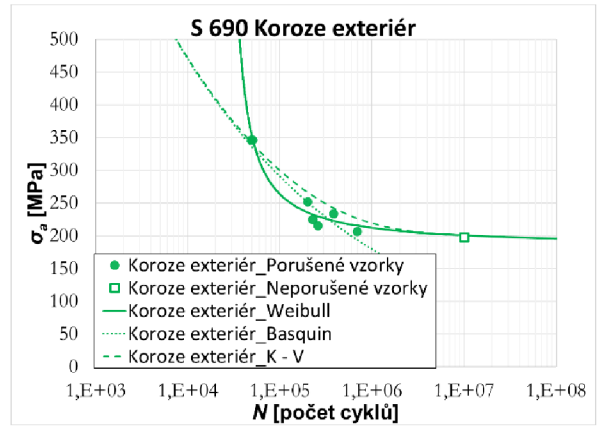
	Referenční	Exteriér	3 dny	6 dní	6+3 dny
<b><i>B</i></b>	9,55	9,94	10,78	9,97	9,00
<b><i>C</i></b>	5,84	5,21	5,53	5,41	4,97
<b><i>β</i></b>	1,64	1,03	2,32	1,76	2,79
<b><i>δ</i></b>	0,22	0,22	0,13	0,26	1,14
<b><i>λ</i></b>	0,07	0,42	0,00	0,01	0,45
<b><i>σ<sub>∞</sub></i> [MPa]</b>	343,8	183,1	252,1	223,6	144,0
<b><i>R</i><sup>2</sup></b>	<b>0,057</b>	<b>0,955</b>	<b>0,724</b>	<b>0,555</b>	<b>0,842</b>

Tab. 5.6: Parametry pro Kohoutův a Věchetův model vzorků oceli S 690

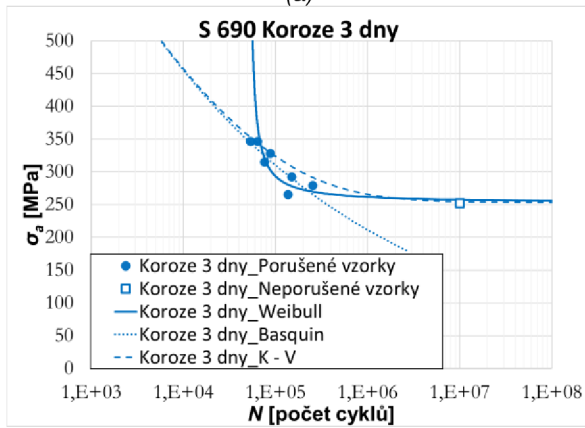
	Referenční	Exteriér	3 dny	6 dní	6+3 dny
<b><i>a</i></b>	460,5	3211,9	2112,6	1327,6	1917,8
<b><i>b</i></b>	-0,01635	-0,20865	-0,16665	-0,13115	-0,16582
<b><i>C</i></b>	$6,0 \times 10^7$	$6,28 \times 10^5$	$3,40 \times 10^5$	$7,04 \times 10^5$	$4,41 \times 10^6$
<b><i>γ</i></b>	0,14267	0,94092	0,96712	0,93419	0,69377
<b><i>σ<sub>c</sub></i> [MPa]</b>	351	198	252	225	153
<b><i>σ<sub>∞</sub></i> [MPa]</b>	340	195,5	250,6	223	144
<b><i>R</i><sup>2</sup></b> (pro <i>N</i> < 50 000)	<b>0,256</b>	<b>0,799</b>	<b>0,675</b>	<b>0,906</b>	<b>0,950</b>
<b><i>R</i><sup>2</sup></b>	<b>0,263</b>	<b>0,856</b>	<b>0,675</b>	<b>0,920</b>	<b>0,948</b>



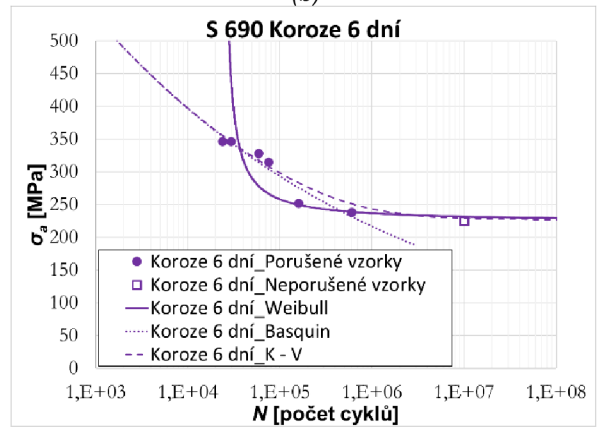
(a)



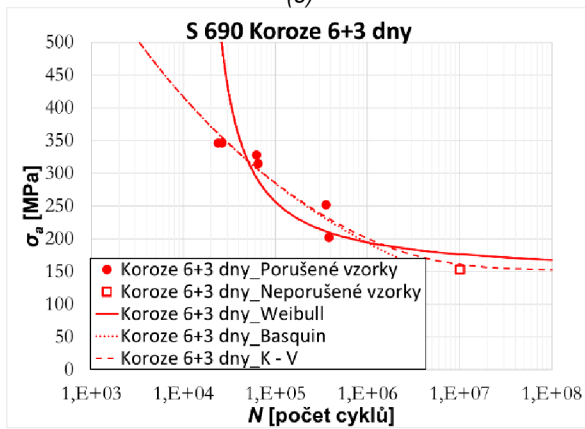
(b)



(c)



(d)



(e)

Obr. 5.4: Grafické znázornění únavového chování oceli S 690 Basquinovým modelem, modelem Kohouta a Věcheta a Weibullovým modelem. Graf referenční oceli (a), korozie v exteriéru (b), 3 dny (c), 6 dní (d) a 6+3 dny (e).

### 5.3. Únavové modely S 960

Tab. 5.7: Parametry pro Basquinův model vzorků oceli S 960

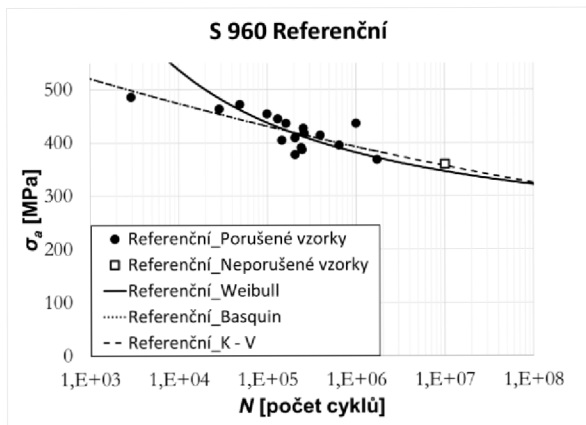
	Referenční	Exteriér	3 dny	6 dní	6+3 dny
<b>a</b>	685	5644	6465	1572	3587
<b>b</b>	-0,0404	-0,2538	-0,2674	-0,1448	-0,2223
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,565</b>	<b>0,981</b>	<b>0,823</b>	<b>0,762</b>	<b>0,773</b>

Tab. 5.8: Parametry pro Weibullův model vzorků oceli S 960

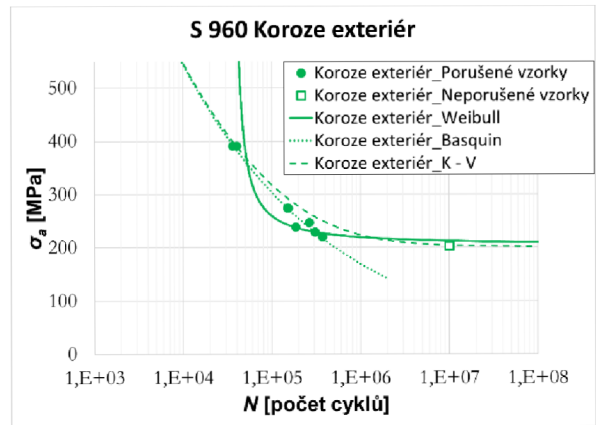
	Referenční	Exteriér	3 dny	6 dní	6+3 dny
<b>B</b>	0,00	10,4	10,4	10,1	9,63
<b>C</b>	5,26	5,31	5,60	5,33	5,51
<b>β</b>	4,34	2,19	1,02	1,01	1,35
<b>δ</b>	3,66	0,33	0,06	0,34	0,21
<b>λ</b>	6,09	0,00	0,00	0,06	0,00
<b>σ<sub>∞</sub> [MPa]</b>	192,5	202,4	270,4	206,4	247,2
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,709</b>	<b>0,799</b>	<b>0,988</b>	<b>0,637</b>	<b>0,979</b>

Tab. 5.9: Parametry pro Kohoutův a Věchetův model vzorků oceli S 960

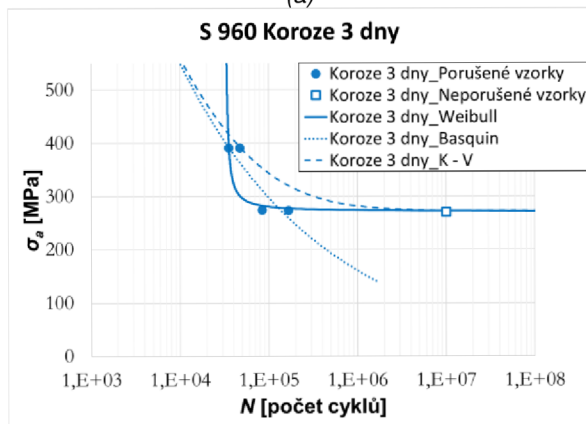
	Referenční	Exteriér	3 dny	6 dní	6+3 dny
<b>a</b>	691,6	5644,3	6465,1	1572,0	3587,0
<b>b</b>	-0,04107	-0,25383	-0,26744	-0,14477	-0,22229
<b>C</b>	$4,43 \times 10^{13}$	$5,02 \times 10^5$	$1,40 \times 10^5$	$8,56 \times 10^5$	$1,47 \times 10^5$
<b>γ</b>	$2,256 \times 10^{-7}$	0,9522	0,98622	0,92115	0,98554
<b>σ<sub>c</sub> [MPa]</b>	360	202,5	270	211,5	247,5
<b>σ<sub>∞</sub> [MPa]</b>	192	200	269	209	246,7
<b>R<sup>2</sup></b> (pro $N < 50\,000$ )	<b>0,514</b>	<b>0,737</b>	-	<b>0,566</b>	<b>0,516</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,641</b>	<b>0,887</b>	<b>0,464</b>	<b>0,787</b>	<b>0,648</b>



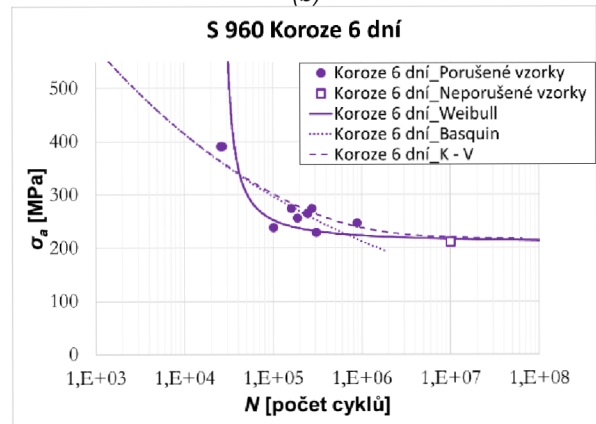
(a)



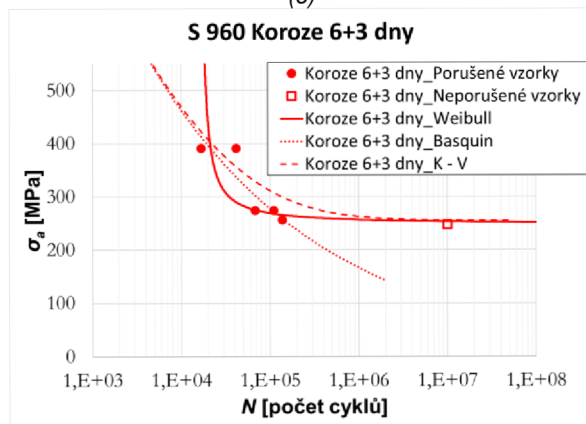
(b)



(c)



(d)



(e)

Obr. 5.5: Grafické znázornění únavového chování oceli S 960 Basquinovým modelem, modelem Kohouta a Věcheta a Weibullovým modelem. Graf referenční oceli (a), koroze v exteriéru (b), 3 dny (c), 6 dní (d) a 6+3 dny (e).

#### 5.4. Porovnání únavového chování jednotlivých druhů ocelí

Následující grafy zobrazují souhrn dat a modelů pro naše tři pozorované oceli. Obsahují jak referenční, tak korodované vzorky a slouží pro lepší porovnání chování při degradaci. Pro přehlednost byly pro porovnání do grafů vloženy pouze modely Basquinovy a Weibullový. V několika případech měly sice modely Kohouta a Věcheta lepší koeficienty determinací, než Weibullový modely, ale byly i případy, kdy zcela postrádaly výpovědní hodnotu, proto byly pro další práci vybrány Weibullový modely s konzistentnější schopností popsání únavového chování.

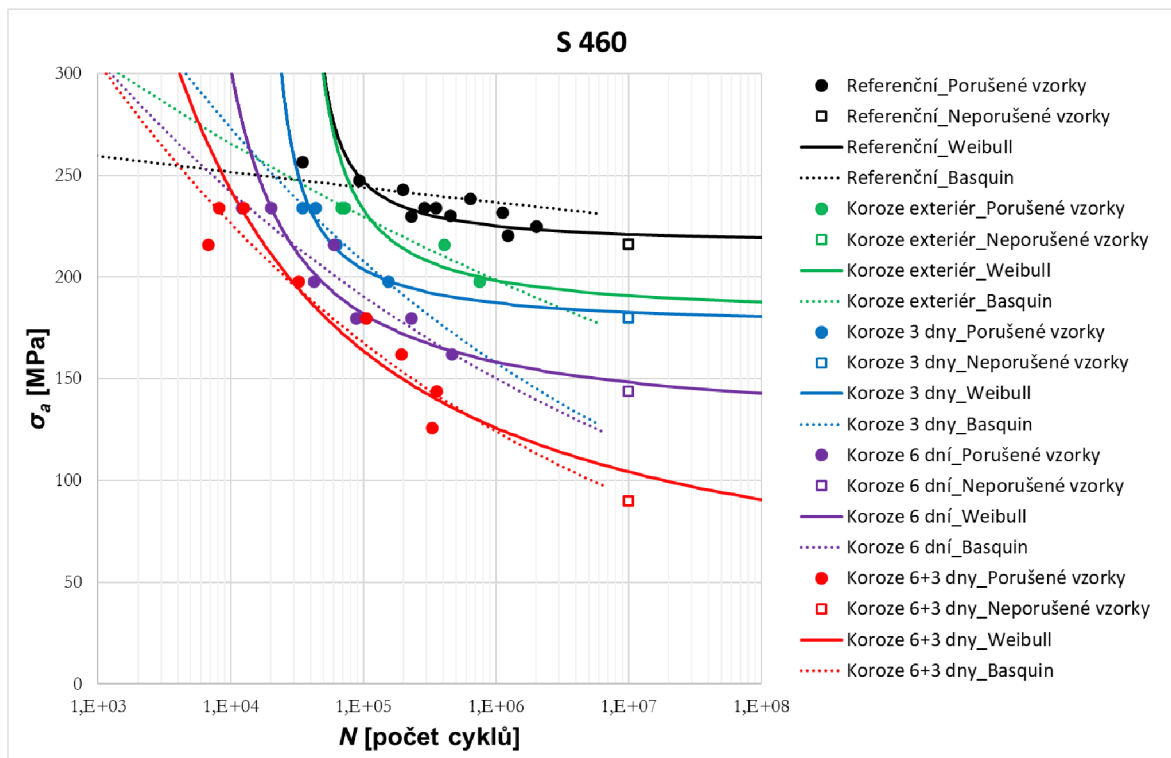
Na grafu na obr. 5.6 můžeme pozorovat, že korodované vzorky snižují svou únosnost vcelku rovnoměrně v závislosti na době, kdy byly vystaveny degradačním vlivům. Vzorky s korozi v exteriéru mají únosnost vyšší než všechny koroze solnou mlhou. Lze tedy předpokládat, že umělé degradace odpovídají svým chováním době, která by v přirozených podmínkách vnějších vlivů prostředí, odpovídala době větší než 1 rok.

Jak uvidíme níže, toto chování není stejné pro oceli s vyšší pevností.

V tabulce 5.10 jsou následně vypočítány procentuální poklesy únosnosti v závislosti na druhu koroze. Konkrétně byl pokles zjišťován pro oblasti 100 tisíc, 1 milionu a 10 milionů cyklů, což je zároveň smluvní mez únavy. Pokles v procentech byl počítán dle vzorce (47).

$$D_{per} = \frac{\sigma_{max,ref}}{(\sigma_{max,ref} - \sigma_{max,i})} * 100 \quad (47)$$

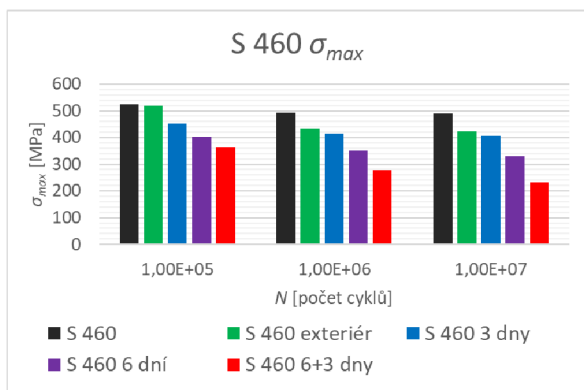
Z grafu na obr. 5.7 je názorně vidět postupný pokles maximálního napětí ve všech třech pozorovaných oblastech. Rozdíl mezi jednotlivými poklesy je do 15 %, kdy v oblasti 100 tisíce cyklů je pokles oceli, která byla vystavena 9 dnům solné mlže, rovný 30 % z původní únosnosti. Tento druh koroze nabývá nejnižších hodnot únosnosti i u zbylých dvou pozorovaných oblastí. Při 1 milionu cyklů je pokles 43 % a v oblasti smluvní meze únavy je únosnost této oceli méně než na poloviční hodnotě. Tyto poklesy také zobrazuje graf na obr. 5.8.



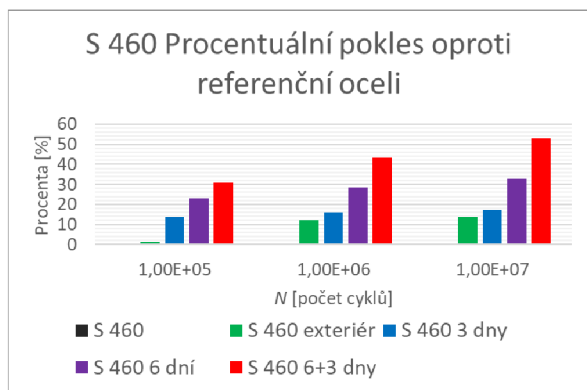
Obr. 5.6: Souhrnný graf únavového chování oceli S 460, obsahuje data jak oceli referenční, tak všech ocelí korodovaných.

Tab. 5.10: Tabulka ztrát únosnosti oceli S 460, podle modelu Castilla–Canteliho, v předem určených oblastech počtu cyklů

S 460	1,00E+05 cyklů				1,00E+06 cyklů				1,00E+07 cyklů			
	$\sigma_a$	$\sigma_{max}$	Rozdíl	Procenta	$\sigma_a$	$\sigma_{max}$	Rozdíl	Procenta	$\sigma_a$	$\sigma_{max}$	Rozdíl	Procenta
	[MPa]			[%]	[MPa]			[%]	[MPa]			[%]
Ref.	236	525	-	-	222	493	-	-	221	491	-	-
Exteriér	233	518	7	<b>1,35</b>	194	432	61	<b>12,36</b>	191	424	67	<b>13,61</b>
3 dny	204	453	73	<b>13,81</b>	187	415	78	<b>15,88</b>	183	406	85	<b>17,36</b>
6 dní	182	404	121	<b>23,03</b>	158	352	141	<b>28,66</b>	148	330	162	<b>32,89</b>
6+3 dny	164	364	162	<b>30,75</b>	126	280	213	<b>43,27</b>	104	232	259	<b>52,80</b>



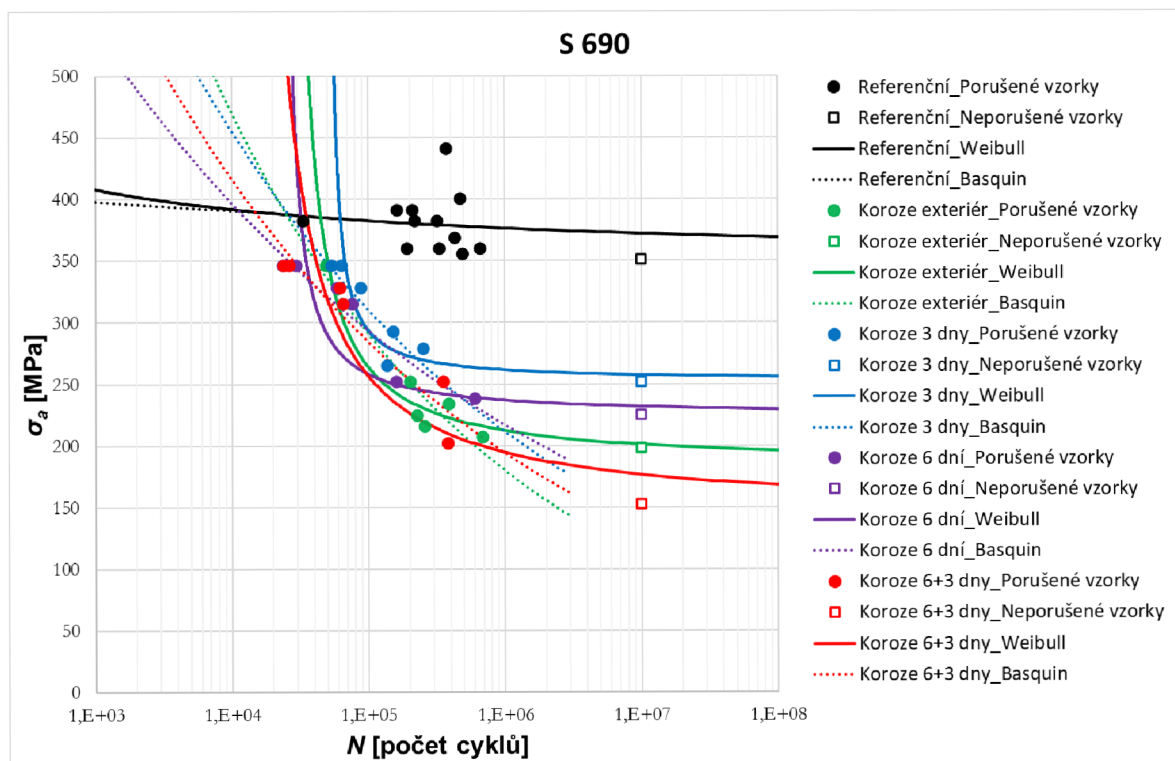
Obr. 5.7: Graf znázorňující pokles maximálního napětí oceli S 460 v závislosti na stupni degradace



Obr. 5.8: Graf procentuálního poklesu únosnosti oceli S 460 v závislosti na stupni degradace

U oceli S 690 můžeme v grafu na obr. 5.9 pozorovat rozdíl oproti dříve zmíněné oceli S 460, kdy dochází k výraznému poklesu únosnosti u degradovaných vzorků oproti referenční nekorodované oceli. Také poloha vzorků v exteriéru se změnila v závislosti na vzorcích uměle degradovaných. Období jednoho roku vnějších vlivů prostředí se teď svou únosností nachází mezi dobou 6 až 9 dnů v solné mlze.

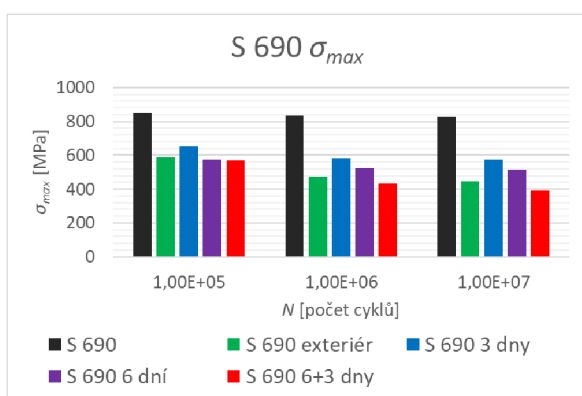
Jak je vidět z tabulky 5.11 podobně jako u oceli S 460 i u oceli S 690 dosahují maximální poklesy, které se opět vyskytují u vzorků 9 denní umělé koroze, podobných hodnot. V první oblasti je to téměř 33 %, ve druhé 48 % a pro třetí 52 %. Rozdíl oproti oceli S 460 je ve skokovém poklesu únosnosti u všech degradovaných ocelí. V předchozím případě byl rozdíl vždy mezi 5 až 15 %. U oceli S 690 dosahuje nejnižší pokles, který je u vzorků vystavených 3 dny solné mlze, v oblasti 100 tisíc cyklů 23 % a ve zbývajících oblastech necelých 31 %. Samotný rozdíl mezi jednotlivými korodovanými oceli už není tak velký, jak je vidět v grafu na obr. 5.10 a 5.11.



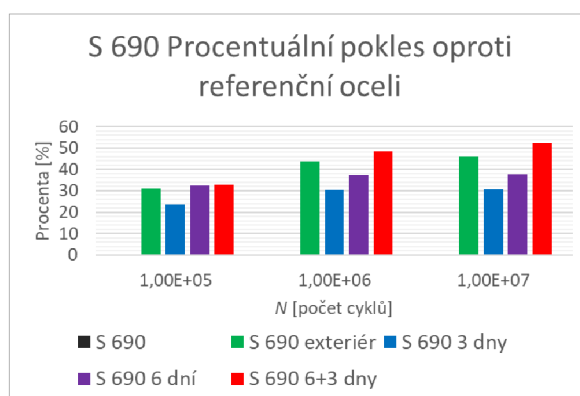
Obr. 5.9: Souhrnný graf únavového chování oceli S 690, obsahuje data jak oceli referenční, tak všech ocelí korodovaných.

Tab. 5.11: Tabulka ztrát únosnosti oceli S 690, podle modelu Castilla–Canteliho, v předem určených oblastech počtu cyklů

S 690	1,00E+05 cyklů				1,00E+06 cyklů				1,00E+07 cyklů			
	$\sigma_a$	$\sigma_{max}$	Rozdíl	Procenta	$\sigma_a$	$\sigma_{max}$	Rozdíl	Procenta	$\sigma_a$	$\sigma_{max}$	Rozdíl	Procenta
	[MPa]			[%]	[MPa]			[%]	[MPa]			[%]
Ref.	383	850	-	-	376	837	-	-	372	827	-	-
Exteriér	264	586	264	<b>31,06</b>	212	472	365	<b>43,60</b>	201	447	380	<b>46,01</b>
3 dny	293	652	198	<b>23,32</b>	262	581	255	<b>30,53</b>	257	572	255	<b>30,82</b>
6 dní	258	574	277	<b>32,54</b>	237	526	310	<b>37,08</b>	232	515	312	<b>37,70</b>
6+3 dny	256	570	280	<b>32,97</b>	195	432	404	<b>48,30</b>	177	392	435	<b>52,55</b>



Obr. 5.10: Graf znázorňující pokles maximálního napětí oceli S 690 v závislosti na stupni degradace



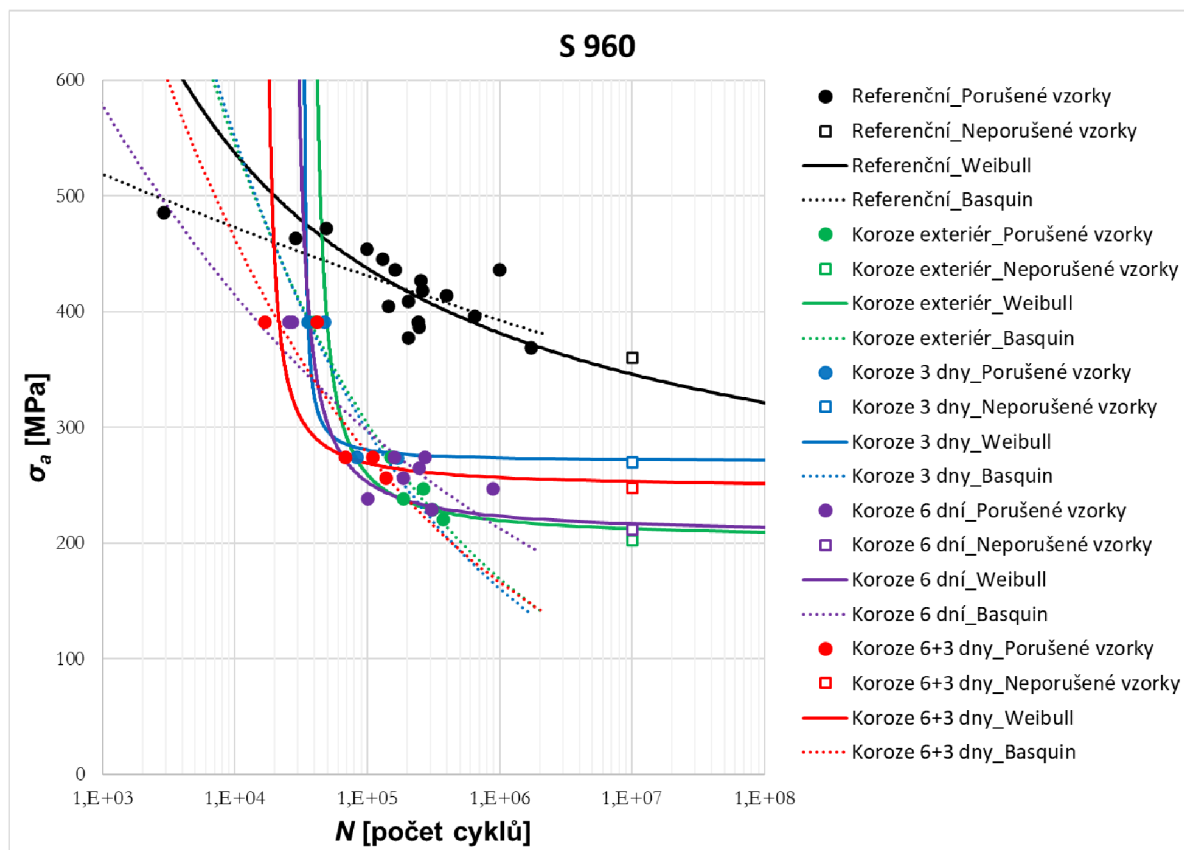
Obr. 5.11: Graf procentuálního poklesu únosnosti oceli S 690 v závislosti na stupni degradace



U oceli S 960 je vidět z obr. 5.12 obdobné chování, jaké jsme mohli vidět u oceli S 690. Také zde dochází k velkému propadu v únosnosti u všech vzorků postižených korozí. Stejně tak koroze v exteriéru odpovídá svým podobným chováním 6 dnům vystavení oceli solné mlze. To, co je zde neobvyklé, jsou výsledky oceli vystavené 9 dnům solné mlze. Z naměřených dat totiž vychází její únosnost vyšší, než je u stejného druhu oceli, který byl vystaven umělé korozi pouze 6 dní. Důvodem by mohlo být pouze malé množství vzorků odzkoušené v oblasti vyšších počtů cyklů, které se nám z časových důvodů podařilo otestovat, a tedy pravděpodobnost odchýlení od reálné meze únavy.

Stejně jako u oceli S 690 i zde je patrný skokový pokles u všech degradovaných vzorků. Navíc z grafu na obr. 5.12 lze pozorovat, že největší změny probíhají mezi 10 až 100 tisíci cykly, kdy dojde k prudkému poklesu, po kterém následuje již jen mírné klesání až k mezi únavy oceli. Procenta poklesu únosnosti v první oblasti 100 tisíce cyklů se pohybují od 35 do 48 %. A následně v dalších oblastech procentuální rozdíl klesají, z důvodu postupného klesání únavové křivky referenční oceli. Ztráty v oblasti smluvní meze únosnosti se pak pohybují mezi 21 až 38 %.

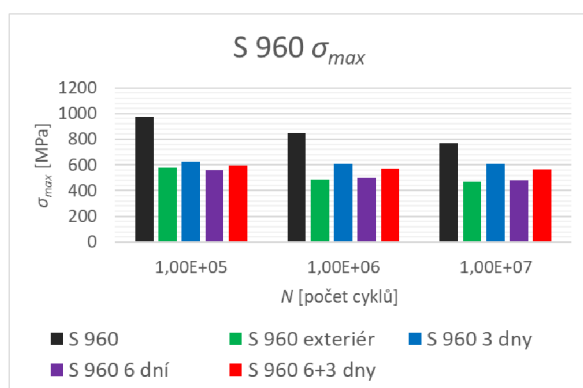
Tento prudký pokles v únavové únosnosti, může být potencionálně velmi nebezpečný u konstrukcí, které jsou tvořeny touto ocelí.



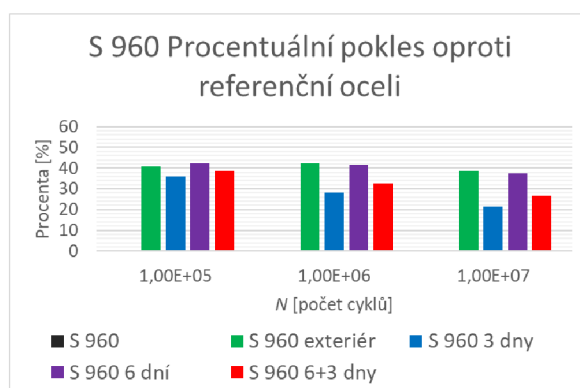
Obr. 5.12: Souhrnný graf únavového chování oceli S 960, obsahuje data jak oceli referenční, tak všech ocelí korodovaných.

Tab. 5.12: Tabulka ztrát únosnosti oceli S 960, podle modelu Castilla–Canteliho, v předem určených oblastech počtu cyklů

S 960	1,00E+05 cyklů				1,00E+06 cyklů				1,00E+07 cyklů			
	$\sigma_a$	$\sigma_{max}$	Rozdíl	Procenta	$\sigma_a$	$\sigma_{max}$	Rozdíl	Procenta	$\sigma_a$	$\sigma_{max}$	Rozdíl	Procenta
	[MPa]			[%]	[MPa]			[%]	[MPa]			[%]
Ref.	438	972	-	-	382	848	-	-	346	769	-	-
Exteriér	259	577	396	<b>40,70</b>	220	488	360	<b>42,47</b>	212	472	297	<b>38,60</b>
3 dny	281	623	349	<b>35,88</b>	274	608	240	<b>28,26</b>	272	605	164	<b>21,28</b>
6 dní	253	562	410	<b>42,21</b>	223	496	352	<b>41,46</b>	217	482	287	<b>37,35</b>
6+3 dny	269	598	374	<b>38,50</b>	257	571	277	<b>32,70</b>	253	563	206	<b>26,79</b>



Obr. 5.13: Graf znázorňující pokles maximálního napětí oceli S 960 v závislosti na stupni degradace



Obr. 5.14: Graf procentuálního poklesu únosnosti oceli S 960 v závislosti na stupni degradace

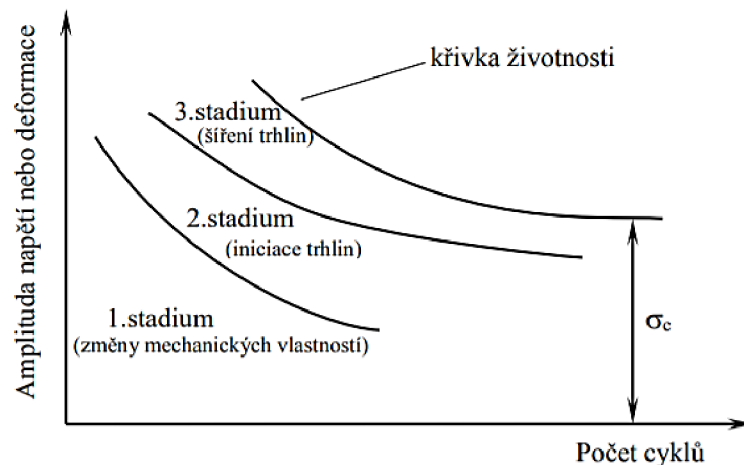
## 6. Stádia únavového procesu

Při cyklickém zatěžování dochází k plastickým deformacím. Její amplituda je v řádech  $10^{-5}$  a nedochází při ní k makroskopickým změnám materiálu. Teprve po kumulaci opakované plastické deformace dochází k výslednému únavovému lomu.

Podle nevratných změn, které jsou způsobeny cyklickou plastickou deformací lze celý únavový proces rozdělit na tři po sobě jdoucí stádia, která se do jisté míry překrývají:

1. Stádium změn mechanických vlastností
2. Stádium nukleace trhlin
3. Stádium růstu trhlin

Schematicky jsou jednotlivá stádia zobrazena na obr. 6.1, jejich hranice však nelze přesně určit. Poslední, třetí stádium šíření trhliny je poté zakončeno křivkou životnosti, která reprezentuje konečný lom vzorku.



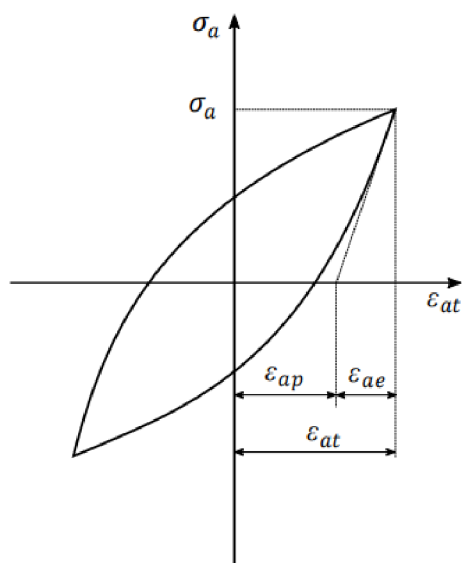
Obr. 6.1: Stádia únavového procesu [14]

### 6.1. Stádium změn mechanických vlastností

V tomto stádiu dochází, vlivem cyklického zatěžování, ke změnám v mikrostruktuře materiálu. Tedy ke změně mechanických, magnetických, elektrických či jiných fyzikálních vlastností. [14, 26]

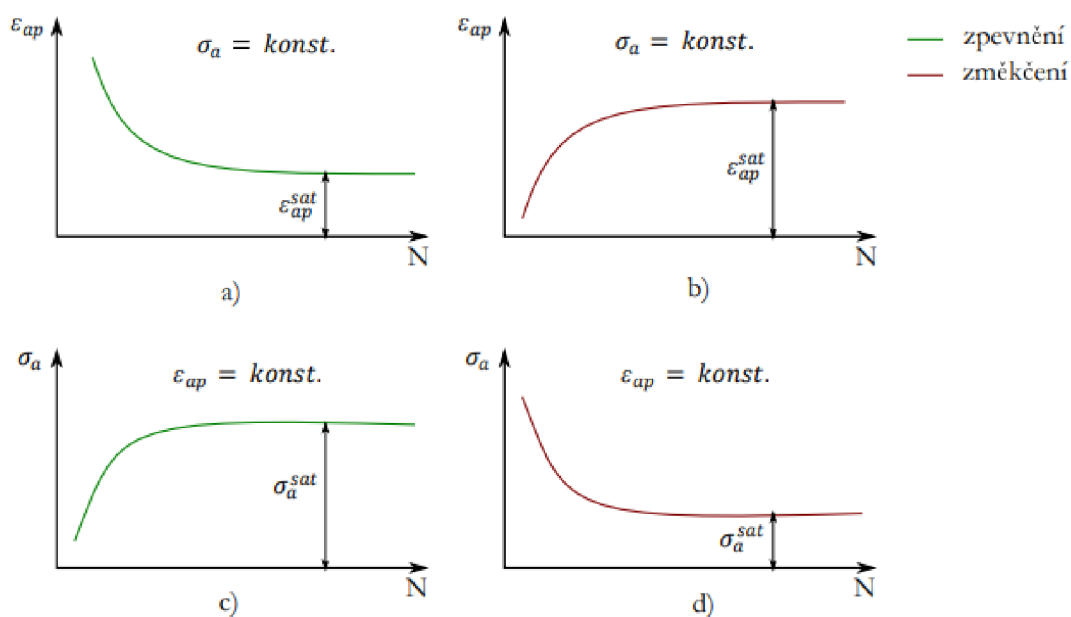
Obecně lze materiály rozdělit na saturující a nesaturující, podle toho, po jakou dobu zatěžování dochází v materiálu k mechanickým změnám. U saturujících materiálů jsou změny nejvýraznější na počátku a postupně s nárůstem počtu cyklů jejich intenzita klesá. Zpravidla se jedná o poměrně nízké počty cyklů v porovnání s celkovou životností, po kterých jsou změny již nevýrazné nebo dokonce zcela ustanou. Oproti tomu nesaturující materiály mění své mechanické vlastnosti po celou dobu životnosti. [13, 14, 26]

Nejzávažnější je změna mechanických vlastností. Nejlepší způsob, jak tyto změny detekovat je přímé měření parametrů hysterezních smyček za chodu zkušebního stroje. Schéma hysterezní smyčky je na obr. 6.2, kde  $\sigma_a$  je amplituda napětí a  $\varepsilon_{at}$  je amplituda celkové deformace, která se skládá z amplitudy plastické deformace  $\varepsilon_{ap}$  a z amplitudy elastické deformace  $\varepsilon_{ae}$ . [13, 26]



Obr. 6.2: Schéma hysterezní smyčky [13]

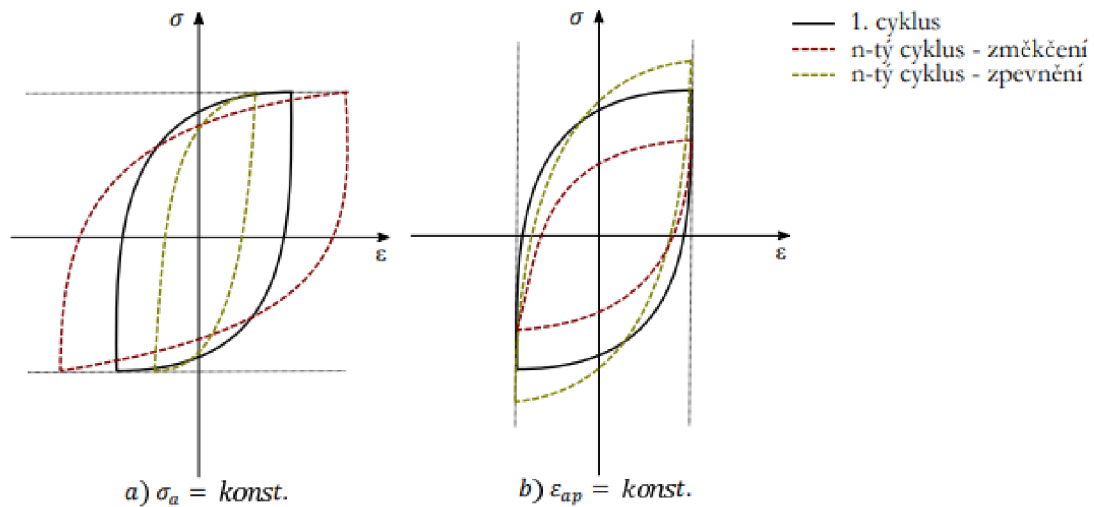
V praxi se používají dva způsoby zatěžování, a to měkký a tvrdý mód. Měkký mód udržuje konstantní napětí a mění pouze amplitudu deformace a tvrdý mód naopak udržuje konstantní amplitudu deformace a mění napětí. Změnami mechanických vlastností dochází k cyklickému zpevnění či změkčení. To se při konstantní amplitudě napětí projeví tím, že pokud amplituda deformace s počtem cyklů klesá, dochází ke zpevnění a pokud roste jedná se o změkčení. Obdobně je tomu i při konstantní amplitudě deformace. Pokud při ní amplituda napětí roste, je to cyklické zpevnění (roste napětí potřebné k dosažení téže deformace) a pokud napětí klesá jedná se o změkčení (klesá napětí potřebné k dosažení téže deformace). Schémata pro znázornění zpevnění a změkčení v závislosti na konstantních amplitudách jsou na obr. 6.3. [27]



Obr. 6.3: Definice cyklického zpevnění a změkčení pro různé režimy zatěžování [13]

Stejně tak se projevuje cyklické zpevnění a změkčení i na hysterezních smyčkách, a to změnou plochy viz obr. 6.4. Cyklické zpevnění při režimu zatěžování  $\sigma_a = \text{konst.}$  se projevuje

poklesem amplitudy deformace a „zúžením“ smyčky, oproti tomu při režimu  $\varepsilon_{ap} = \text{konst.}$  narůstá amplituda napětí. Velmi často má však cyklické plastické chování nemonotónní průběh. Cyklické zpevnění může být např. vystřídáno cyklickým změkčením nebo naopak. [14]



Obr. 6.4: Hysterezní smyčky pro měkké a tvrdé zatěžování [13]

### Cyklická křivka napětí – deformace

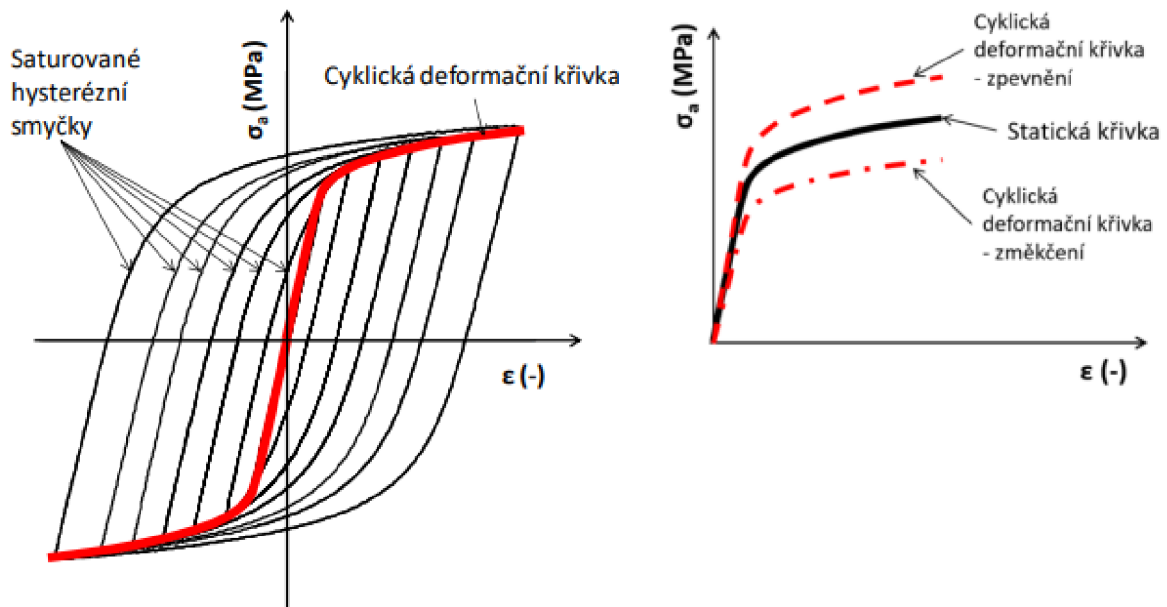
Po proběhnutí cyklického zpevnění nebo změkčení se mechanické vlastnosti již dále nemění a přecházejí do saturevaného stavu. Tím vznikne stabilní hysterezní smyčka. Pokud spojíme vrcholy stabilních hysterezních smyček dostaneme cyklickou křivku napětí–deformace viz obr. 6.5. Tato křivka je významnou materiálovou charakteristikou, která vyjadřuje vztah mezi amplitudou napětí a deformací. [13, 26, 27]

Tahový diagram reprezentuje závislost napětí na deformaci v prvním čtvrtcyklu. Cyklická deformační křivka představuje tutéž závislost po proběhnutí zpevnění a změkčení. Pokud tyto křivky vzájemně porovnáme lze podle toho odhadovat cyklickou deformační odezvu materiálu. Pokud křivka tahového diagramu leží nad cyklickou křivkou, materiál cyklicky změkčuje. Jestli že leží pod ní, hovoříme o cyklickém zpevnění. Zpevnění a změkčení schematicky zobrazeno na obr. 6.5. [26, 27]

Cyklickou křivku lze aproximovat užitím vztahu:

$$\sigma_a = K' * \varepsilon_{ap}^{n'} , \tag{48}$$

kde  $K'$  je modul cyklického zpevnění a  $n'$  je exponent cyklického zpevnění.



Obr. 6.5: Cyklická deformační křivka (vlevo) a porovnání cyklické deformační křivky s tahovým diagramem (vpravo) [28]

## 6.2. Stádium nukleace trhlin

K nukleaci trhlin homogenního materiálu dochází vždy na povrchu, oproti tomu u makroskopicky strukturně nehomogenních materiálů tomu tak vždy není. Stejně tak u materiálů s vnitřními geometrickými defekty nemusí být nukleace na povrchové vrstvě. V případě, kdy se jedná o vnitřní defekty trhlin nukleace zcela chybí. [13]

Nukleace trhlin je nezvratný proces, aby však k nukleaci došlo musí být splněny tři podmínky. Významná vrubová topografie, vysoce lokalizovaná plastická deformace v kořeni intruze a vhodné dislokační uspořádání podél povrchových intruzí. [13]

Koncentraci napětí způsobuje vrubová topografie, zároveň musí intenzita nevratné cyklické plastické deformace být v kořeni intruze vyšší než v ostatních místech. K tomu je potřeba dislokační struktura pro zabránění lokální relaxace napětí a zároveň příspěvek ke zvýšení „ostroti“ kořene intruze, proto je nezbytné vhodné dislokační uspořádání. [13]

### Mechanismy nukleace mikrotrhlin

Pro nukleaci mikrotrhlin bylo navrženo mnoho modelů, ty se však mohou uplatňovat jen v nukleačních místech (místo silné lokalizace plastické deformace). Problém nastává v rozlišování mezi ostrou intruzí a mikrotrhlinou. Z toho důvodu některé z navržených mechanismů nerozlišují intruzi a mikrotrhlinu. [26]

Samotné mechanismy se dají rozdělit do pěti hrubých skupin [26]

#### 1) Modely nerozlišující mezi intruzí a mikrotrhlinou

Tento mechanismus předpokládá, že ke vzniku mikrotrhliny dochází spojitým prorůstáním intruze do hloubky, a to pomocí opakovaného skluzu buď na jednom nebo na dvou skluzových systémech

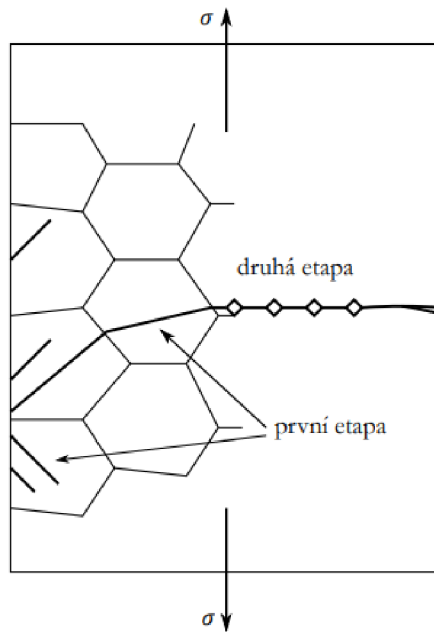
- 2) Nukleace křehkým prasknutím v kořeni intruze  
Tento mechanismus rozlišuje intruzi a trhlinu. Mikrotrhliny začínají vždy na ostrých intruzích bez ohledu na typu okolní dislokační struktury. Předpoklad spočívá v tom, že mikrotrhlina se vytvoří tehdy, když koncentrace napětí kolem intruzí, která nemůže být odrelaxována skluzovými procesy (následkem zpevnění), se zvýší natolik, že přesáhne meziatomové vazebné síly.
- 3) Vznik trhliny kondenzací vakancí  
Bylo zjištěno že v průběhu cyklické deformace dochází k vysoké koncentraci vakancí (bodových defektů) v celém zatěžovaném objemu. Vzniklé vakance mohou vytvářet shluky a dutiny, které pokud jsou dostatečně velké se dají považovat za trhliny
- 4) Dekoheze krystalu podél skluzové roviny způsobená akumulací dislokací  
V kritických místech se vytváří taková konfigurace dislokací, která vede k lokálnímu zvýšení napětí nebo energie, dostačující ke ztrátě soudržnosti v oblasti několika Å až několika desítek Å ( $\text{Å} = 10^{-10} \text{ m}$ ).
- 5) Nukleace na hranicích zrn  
Model předpokládá vysoký stupeň cyklické plastické deformace napříč celou povrchovou vrstvou zrn. Zrna tvoří překážku plastické deformaci, postupně se poškozuje hranice zrna a vzniká mikrotrhlina.

### 6.3. Stádium růstu trhlin

Nukleační stádium končí vytvořením povrchových mikrotrhlin. Ty leží podél skluzových rovin, v nichž je největší smykové napětí. Pro jednoosé namáhání platí, že smykové napětí je největší v rovinách, které svírají úhel  $45^\circ$  se směrem vnějšího napětí. [26]

Během zatěžování se trhliny propojují a rostou dále do hloubky podél aktivních skluzových rovin. Většina z nich se však brzy zastavuje a pouze pár proniká do hloubky větší než desítky mikronů. S narůstající délkou se trhliny vychylují z aktivních skluzových rovin a stáčí se do směru kolmého k vektoru hlavního napětí. Z důvodů vysoké koncentrace napětí se na čele těchto trhlin vytváří plastická zóna. Tomuto přechodu se říká první etapa. [26]

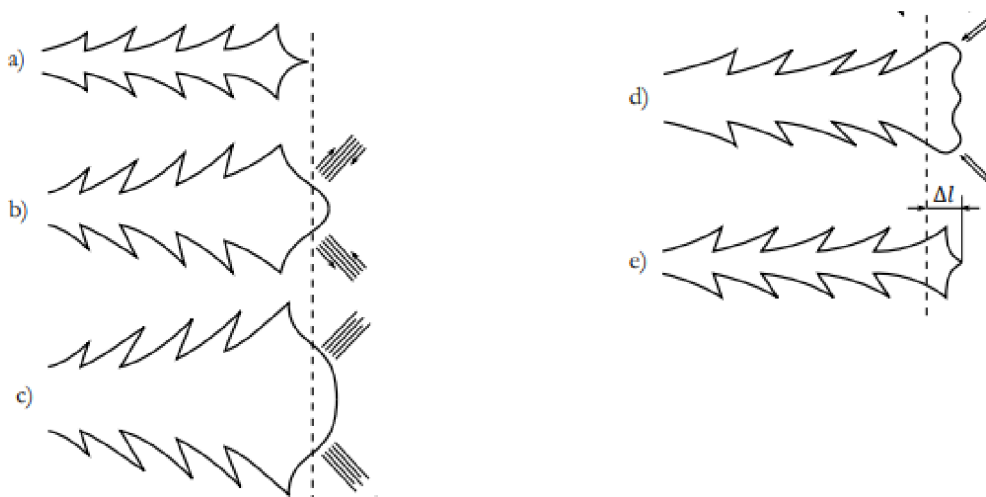
Ve druhé etapě se pak zpravidla šíří už jen jedna trhlina, které se označuje jako magistrální. Schématické znázornění obou etap je na obr. 6.6. Rychlost šíření trhlin v první etapě je malá, proto je počet cyklů pro její rozvoj výrazně vyšší než počet cyklů potřebný ve druhé fázi. Rozdíl nastává, pokud je těleso vrubované. Oproti hladkému povrchu celé šíření trhliny proběhne ve druhé etapě. [26]



Obr. 6.6: Etapy šíření trhliny [26]

Druhou etapu šíření trhliny popisuje Lairdův model, který vychází z mikroreliefu lomové plochy a z pozorování tvaru špičky trhliny při zatěžování vysokými amplitudami. Dochází při tom k opakovanému otupování a zaostřování špičky trhliny. Trhlina se otevírá a zavírá, přičemž vytváří žlábků, kterým se říká striace. Mechanismus šíření trhliny je znázorněn na obr. 6.7. [13]

Trhlina na počátku odpovídá druhé etapě (a). Na špičce trhliny dochází k plastické lokalizované deformaci z důvodů koncentrace napětí (b). S dalším růstem napětí se trhlina otevírá a špička zaobluje (c). Při odlehčování se obě části trhliny opět přibližují, ale povrch není vrácen do zcela původní polohy, jelikož došlo k plastické deformaci. Zůstávají tedy vytažené tzv. „ušičky“ (d). Po úplném odlehčení se trhlina vrátí do původní konfigurace s přírůstkem délky  $\Delta l$  (e). [13]



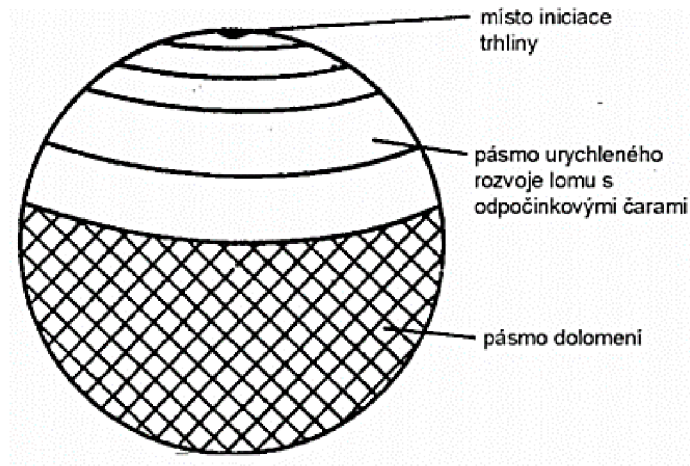
Obr. 6.7: Schéma Lairdova mechanismu šíření trhliny [13]



## 6.4. Konečný lom

Konečný lom je závěrečným stádiem celého únavového cyklu. Dochází k postupnému zmenšování průřezu, dokud horní napětí zátěžného cyklu nepřekročí kritické napětí ve zbylé části průřezu. Konečný lom má zpravidla křehký nebo kvazi-křehký charakter a skládá se z několika částí: [13, 27]

- Místo iniciace trhliny  
Spojením několika mikroskopických center vzniká makroskopické místo zárodku únavového lomu
- Pásmo urychleného rozvoje lomu  
Vznikají zde sekundární únavové (odpočinkové) čáry, v důsledku změny směru postupu únavových trhlin. To je způsobeno změnou vnějšího zatížení, vadami materiálu, zbytkovým napětím přerozdělením napětí následkem postupu trhliny a vlivem blízko umístěných trhlin.
- Pásmo dolomení  
V těchto místech dojde k dolomení vzorku.



Obr. 6.8: Schéma únavového lomu [27]

## 7. Pozorování lomových ploch testovaných ocelí

Poté co byly vzorky porušeny při únavových zkouškách, byly vyfoceny jejich lomové plochy, které byly dále zkoumány. Fotografie byly pořizovány na digitálním mikroskopu Olympus DXS 1000 viz obrázek 7.1.

Pro další zpracování informací z fotografií byl použit program pro zpracování obrazu ImageJ. Pomocí něj byly změřeny a zaznamenány lomové plochy jednotlivých vzorků, a ty byly následně rozděleny na plochy pásma urychleného rozvoje  $A_{roz}$  lomu a na pásmo dolomení  $A_{dol}$ , které se na fotografiích vyznačovalo svou hrubší strukturou oproti hladšímu pásmu urychleného rozvoje únavové trhliny.

Plochy jednotlivých pásem jsou spolu s daty o zatěžování uvedeny v tabulkách v příloze 3 a grafické výstupy jsou ukázány na obrázcích níže v této kapitole. Grafy vyjadřují závislost mezi plochami a maximálním napětím při zatěžování a jsou doplněny o spojnice trendů, díky kterým je lépe vidět změna v plochách jednotlivých pásem.

Záznamy všech vyfotografovaných lomových ploch jsou zaznamenány v příloze 4. Níže jsou podrobně rozebírány a popisovány pouze plochy vzorků, které se vyskytovaly v určených oblastech počtu cyklů, a tedy mohou být porovnávány i s ostatními druhy ocelí a korozi s podobným počtem cyklů. Konkrétně se jedná o tři oblasti a to 40 000, 200 000 a 600 000 cyklů. Tyto hodnoty byly určeny na základě požadavků, aby počty cyklů měly od sebe viditelný odstup a tím byly pozorovatelné změny při nárůstu počtu cyklů a zároveň, aby se v blízkosti určené hranice nacházel dostatečný počet vzorků pro porovnání. Během zkoušek se však nepodařilo vždy odzkoušet vzorky pro všechny oblasti. Proto u některých ocelí chybí fotografie některé z lomových ploch.

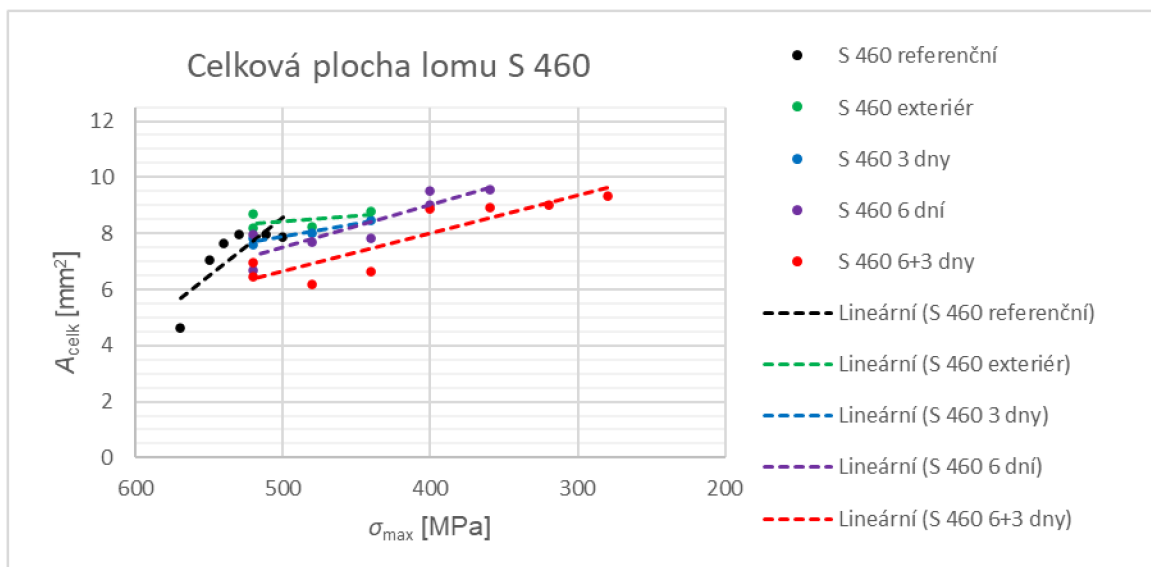


Obr. 7.1: Fotografie digitálního mikroskopu Olympus DXS 1000

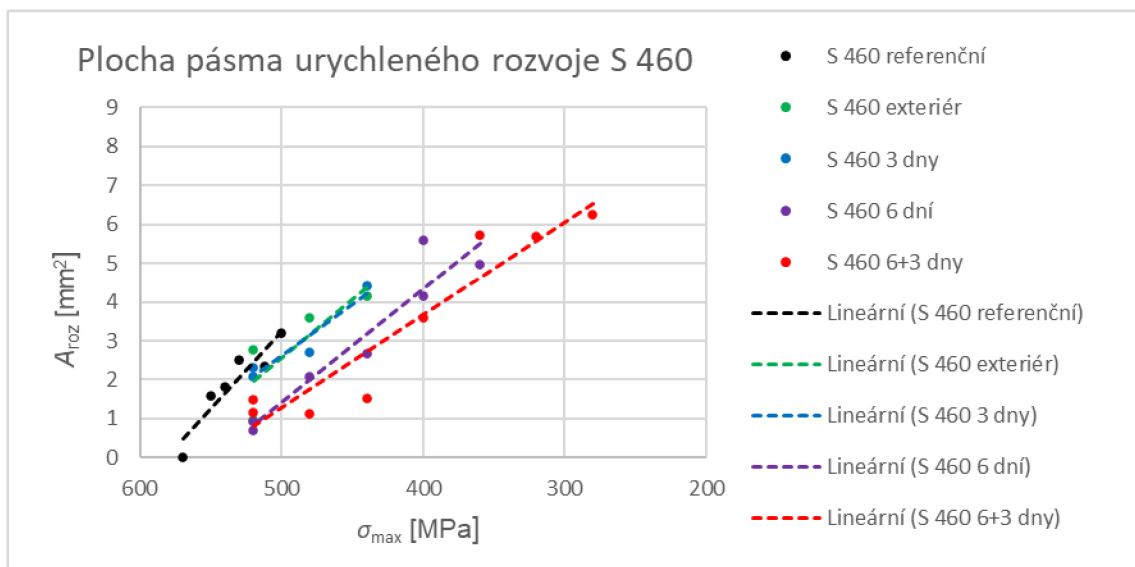
### 7.1. S 460

Graf na obrázku 7.2 udává změnu celkové plochy lomu v závislosti na snižujícím se maximálním napětí při zatěžování. Je vidět, že s klesajícím napětím plocha lomu u oceli S 460 roste. Při vysokém napětí totiž nedochází k velkému šíření únavových trhlin a vzorek má tendenci se protáhnout do tzv. „krčku“ dokud se nezmenší plocha do té míry, až se vzorek naráz poruší. Toto chování lze velmi dobře vidět z fotografie vzorku na obrázku 7.6, kde není patrná prakticky žádná plocha urychleného rozvoje lomu a místo toho vidíme postupně se zmenšující průměr vzorku a výsledný dolom.

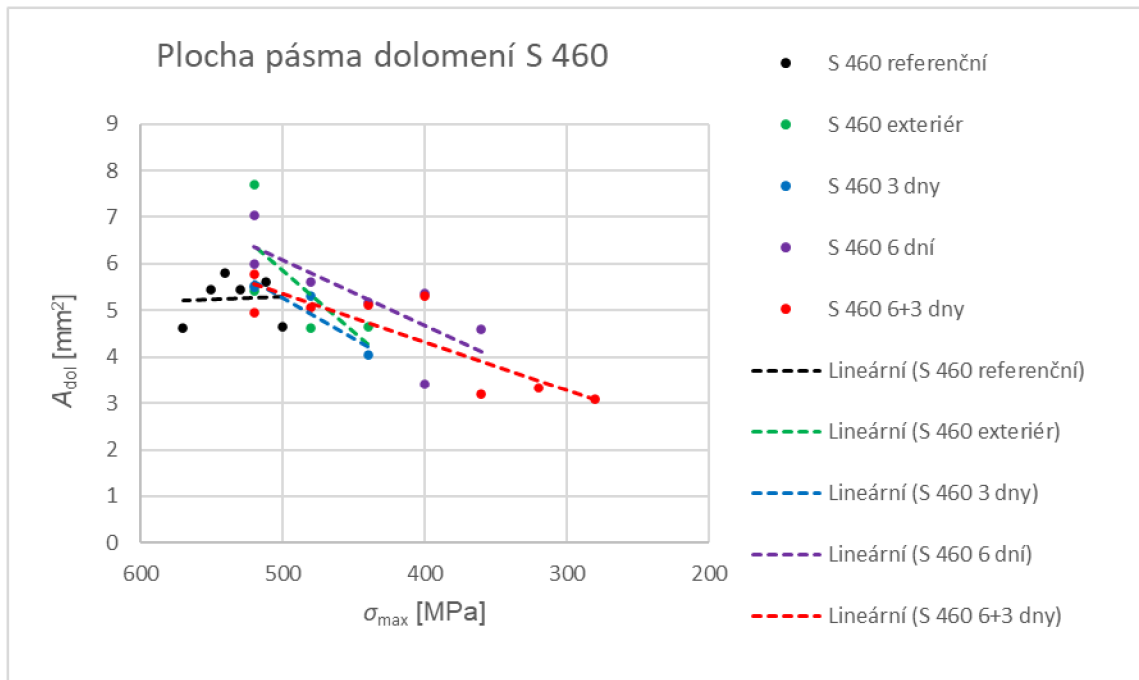
Toto chování potvrzuje i graf na obrázku 7.3, kdy při vysokém napětí nabývají plochy pásem urychleného rozvoje lomu nízkých hodnot, při snížení tohoto napětí však dochází k výraznému růstu těchto ploch, a tedy i k růstu celkové plochy lomu. Naopak pásmo dolomení se postupně u korodovaných vzorců oceli S 460 zmenšuje viz graf na obrázku 7.4.



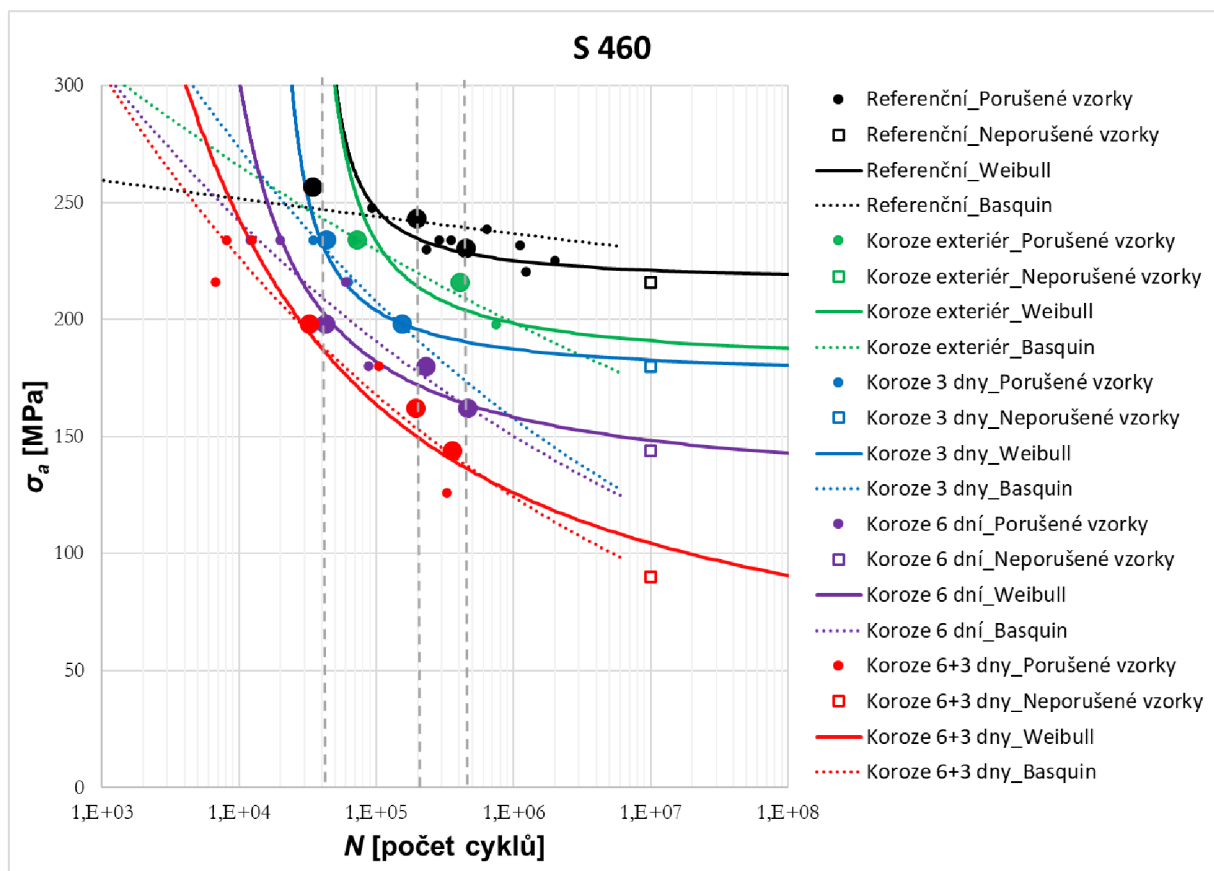
Obr. 7.2: Graf závislosti celkové plochy lomu oceli S 460 na maximálním napětí porušených vzorků.



Obr. 7.3: Graf závislosti plochy pásma urychleného rozvoje oceli S 460 na maximálním napětí porušených vzorků.



Obr. 7.4: Graf závislosti plochy pásma dolomení oceli S 460 na maximálním napětí porušených vzorků.



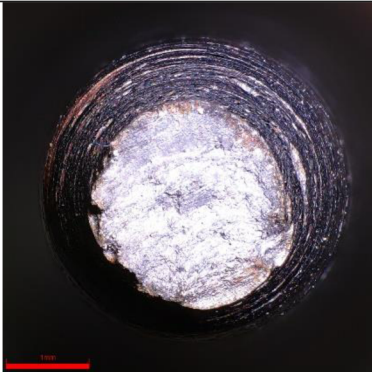
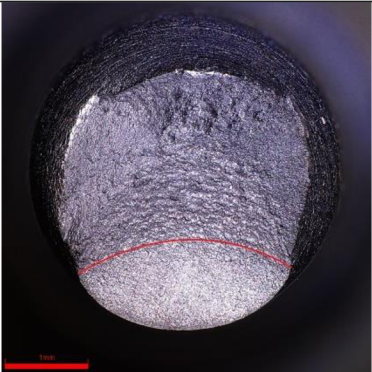
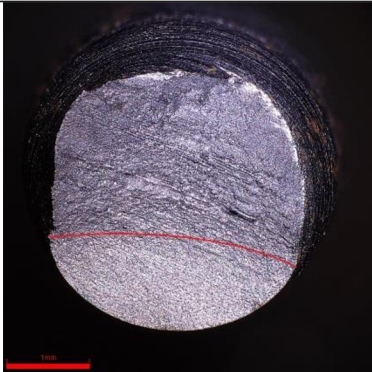
Obr. 7.5: Graf únavových modelů oceli S 460 se zvýrazněnými vzorky vyskytující se v pozorovaných oblastech

Jak už bylo řečeno dříve, u referenční oceli S 460 je velmi dobře pozorovatelný jev tvorby „krčku“ při dolamování vzorků. Jak je vidět na fotografiích na obrázcích 7.7 a 7.8, v oblasti šíření únavové trhliny se vzorek snaží udržovat stejný tvar a průměr jako na počátku zatěžování. Avšak v momentě, kdy se vzorek začne dolamovat, okraje v tomto pásmu se začnou protahovat, podobně jak je vidět na obrázku 7.6, a zmenšují tak samotnou plochu dolomení.

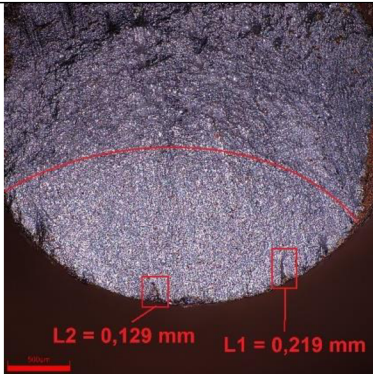
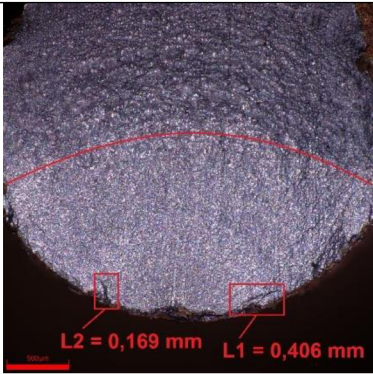
U korodovaných vzorků si můžeme všimnout, že dochází k tvorbě marginálních trhlin, které zasahují mnohdy i hluboko do vzorku a způsobují tak snižování únosnosti. Tvorba těchto trhlin může být následek, kdy vlivem korodování vzorků dochází na povrchu k tvorbě nerovností a tím i koncentrátorů napětí. Z těchto oslabených míst se pak následně šíří i samotné pásmo urychleného rozvoje lomu.

Velikost trhlin se také odvíjí od doby strávené v korozivním prostředí. Můžeme vidět, že délky trhlin u vzorků vystavených pouze třem dnům solné mlže dosahují délek pouze 0,2 až 0,4 mm (obr. 7.11 a 7.12). Oproti tomu vzorky, které tam byly 9 dní mají trhliny délky 0,5 až 1,2 mm (obr. 7.16 až 7.18).

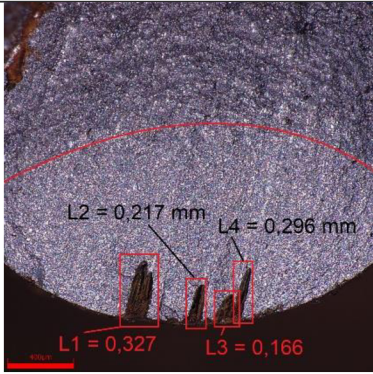
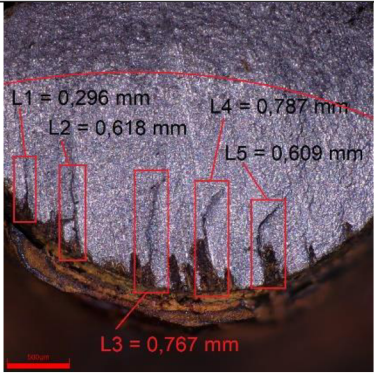
### S 460 referenční

$N = 34\ 667$ $\sigma_{max} = 570\ \text{MPa}$ $\sigma_a = 256,5\ \text{MPa}$	$N = 197\ 598$ $\sigma_{max} = 540\ \text{MPa}$ $\sigma_a = 243\ \text{MPa}$	$N = 450\ 215$ $\sigma_{max} = 512\ \text{MPa}$ $\sigma_a = 230,4\ \text{MPa}$
		
<p>Obr. 7.6: Fotografie lomové plochy oceli S 460 referenční, vzorek č. 7</p>	<p>Obr. 7.7: Fotografie lomové plochy oceli S 460 referenční, vzorek č. 16</p>	<p>Obr. 7.8: Fotografie lomové plochy oceli S 460 referenční, vzorek č. 14</p>
$A_{celk} = 4,637\ \text{mm}^2$	$A_{celk} = 7,621\ \text{mm}^2$ $A_{roz} = 1,824\ \text{mm}^2$	$A_{celk} = 7,944\ \text{mm}^2$ $A_{roz} = 2,331\ \text{mm}^2$

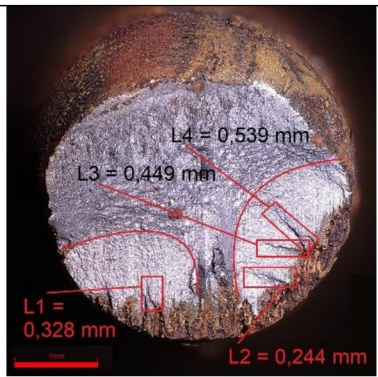
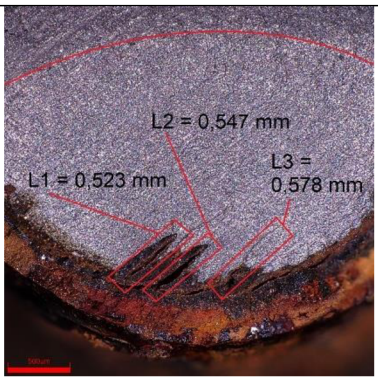
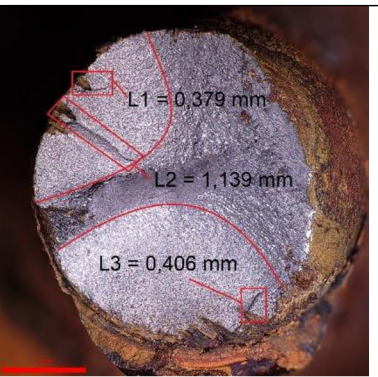
## S 460 exteriér

$N = 72\,263$ $\sigma_{max} = 520\text{ MPa}$ $\sigma_a = 234\text{ MPa}$		$N = 408\,255$ $\sigma_{max} = 480\text{ MPa}$ $\sigma_a = 216\text{ MPa}$
 <p><math>L2 = 0,129\text{ mm}</math>   <math>L1 = 0,219\text{ mm}</math></p> <p><i>Obr. 7.9: Fotografie lomové plochy oceli S 460 koroze v exteriéru, vzorek č. 2</i></p>		 <p><math>L2 = 0,169\text{ mm}</math>   <math>L1 = 0,406\text{ mm}</math></p> <p><i>Obr. 7.10: Fotografie lomové plochy oceli S 460 koroze v exteriéru, vzorek č. 3</i></p>
$A_{celk} = 8,194\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 2,771\text{ mm}^2$ $L_{max} = 0,219\text{ mm}$		$A_{celk} = 8,214\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 3,604\text{ mm}^2$ $L_{max} = 0,406\text{ mm}$

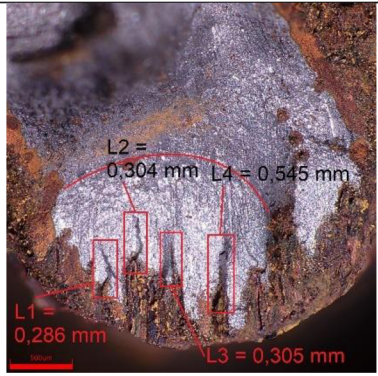
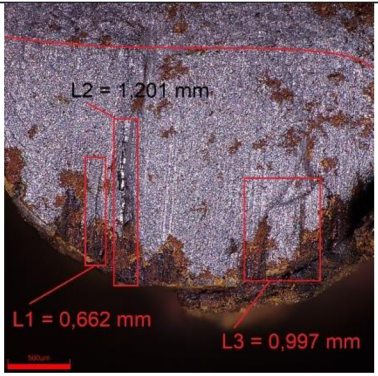
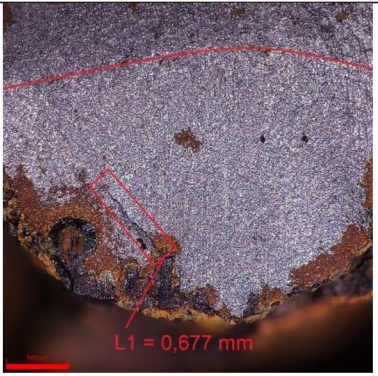
## S 460 3 dny

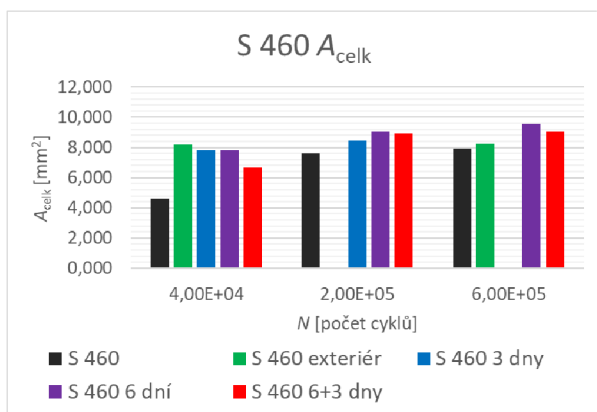
$N = 43\,425$ $\sigma_{max} = 520\text{ MPa}$ $\sigma_a = 234\text{ MPa}$	$N = 153\,602$ $\sigma_{max} = 440\text{ MPa}$ $\sigma_a = 198\text{ MPa}$	
 <p><math>L2 = 0,217\text{ mm}</math>   <math>L4 = 0,296\text{ mm}</math>  <math>L1 = 0,327</math>   <math>L3 = 0,166</math></p> <p><i>Obr. 7.11: Fotografie lomové plochy oceli S 460 korodované 3 dny, vzorek č. 2</i></p>	 <p><math>L1 = 0,296\text{ mm}</math>   <math>L4 = 0,787\text{ mm}</math>  <math>L2 = 0,618\text{ mm}</math>   <math>L5 = 0,609\text{ mm}</math>  <math>L3 = 0,767\text{ mm}</math></p> <p><i>Obr. 7.12: Fotografie lomové plochy oceli S 460 korodované 3 dny, vzorek č. 4</i></p>	
$A_{celk} = 7,817\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 2,308\text{ mm}^2$ $L_{max} = 0,327\text{ mm}$	$A_{celk} = 8,445\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 4,402\text{ mm}^2$ $L_{max} = 0,618\text{ mm}$	

### S 460 6 dní

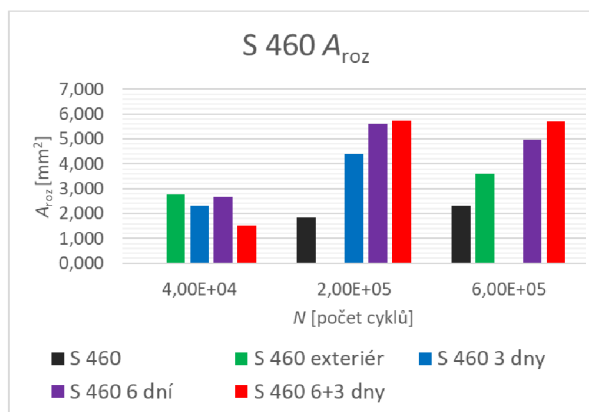
$N = 42\,457$ $\sigma_{max} = 440\text{ MPa}$ $\sigma_a = 198\text{ MPa}$	$N = 228\,652$ $\sigma_{max} = 400\text{ MPa}$ $\sigma_a = 180\text{ MPa}$	$N = 464\,266$ $\sigma_{max} = 360\text{ MPa}$ $\sigma_a = 162\text{ MPa}$
		
<p>Obr. 7.13: Fotografie lomové plochy oceli S 460 korodované 6 dní, vzorek č. 3</p>	<p>Obr. 7.14: Fotografie lomové plochy oceli S 460 korodované 6 dní, vzorek č. 5</p>	<p>Obr. 7.15: Fotografie lomové plochy oceli S 460 korodované 6 dní, vzorek č. 6</p>
$A_{celk} = 7,845\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 2,675\text{ mm}^2$ $L_{max} = 0,539\text{ mm}$	$A_{celk} = 9,018\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 5,593\text{ mm}^2$ $L_{max} = 0,578\text{ mm}$	$A_{celk} = 9,571\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 4,972\text{ mm}^2$ $L_{max} = 1,139\text{ mm}$

### S 460 6+3 dny

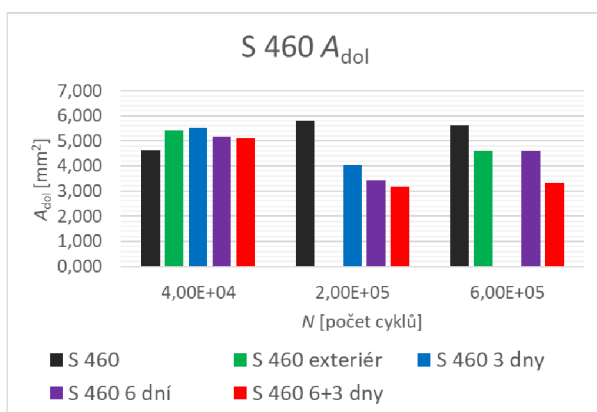
$N = 32\,583$ $\sigma_{max} = 440\text{ MPa}$ $\sigma_a = 198\text{ MPa}$	$N = 193\,457$ $\sigma_{max} = 360\text{ MPa}$ $\sigma_a = 162\text{ MPa}$	$N = 357\,921$ $\sigma_{max} = 320\text{ MPa}$ $\sigma_a = 144\text{ MPa}$
		
<p>Obr. 7.16: Fotografie lomové plochy oceli S 460 korodované 9 dní, vzorek č. 3</p>	<p>Obr. 7.17: Fotografie lomové plochy oceli S 460 korodované 9 dní, vzorek č. 5</p>	<p>Obr. 7.18: Fotografie lomové plochy oceli S 460 korodované 9 dní, vzorek č. 6</p>
$A_{celk} = 6,652\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 1,527\text{ mm}^2$ $L_{max} = 0,546\text{ mm}$	$A_{celk} = 8,932\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 5,740\text{ mm}^2$ $L_{max} = 1,201\text{ mm}$	$A_{celk} = 9,014\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 5,688\text{ mm}^2$ $L_{max} = 0,677\text{ mm}$



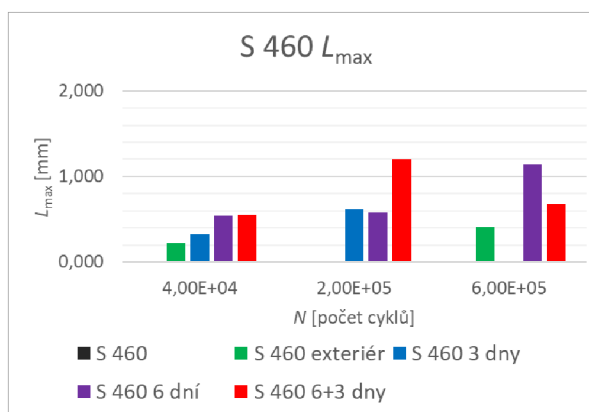
Obr. 7.19: Graf celkových lomových ploch vzorků pozorovaných oblastí oceli S 460



Obr. 7.20: Graf plochy pásma urychleného rozvoje lomu vzorků pozorovaných oblastí oceli S 460



Obr. 7.21: Graf plochy pásma dolomení vzorků pozorovaných oblastí oceli S 460



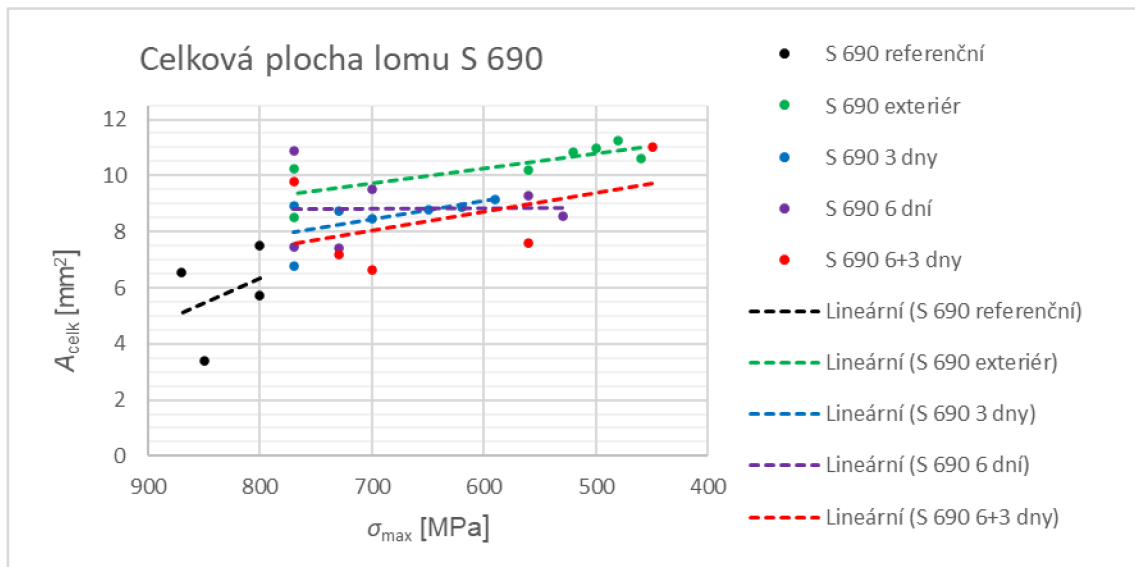
Obr. 7.22: Graf délky největší trhliny vzorků pozorovaných oblastí oceli S 460



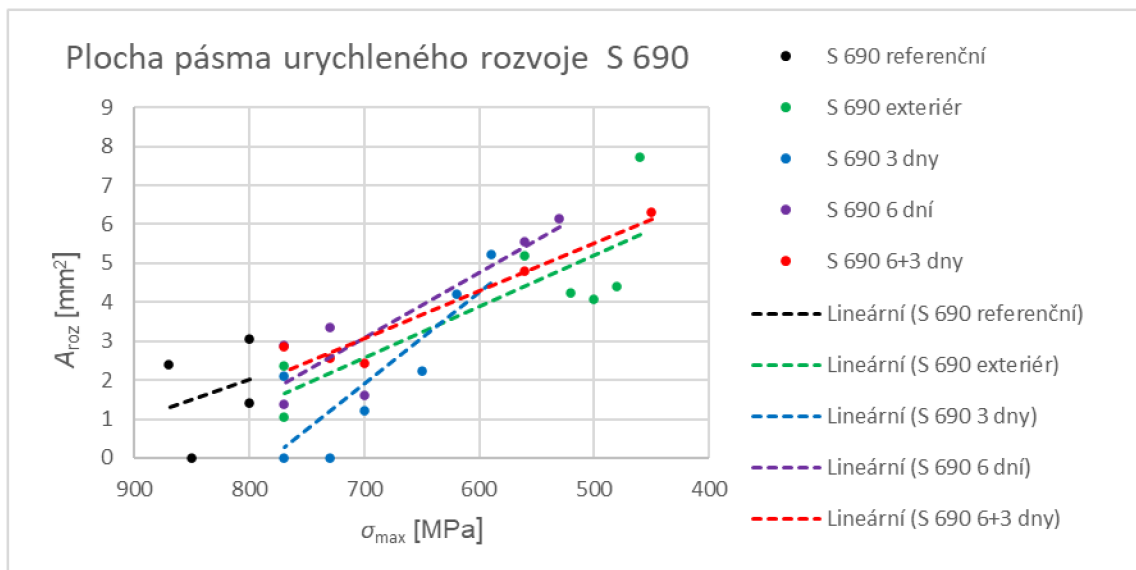
## 7.2. S 690

U oceli S 690 můžeme pozorovat obdobné chování tvorby a složení jednotlivých pásem lomů. Z grafu na obr. 7.23 je opět viditelný postupný nárůst celkové plochy lomu, při snižujícím se napětí. V tomto případě však hodnoty při snížení napětí dosahují vyšších hodnot celkových ploch oproti dříve popisované oceli S 460. Pro ocel S 460 dosahovaly nejvyšší plochy, v závislosti na způsobu koroze, do  $9,5 \text{ mm}^2$ . Z původní plochy vypočtené pomocí průměru vzorku 4 mm, viz obr. 3.4, která činila  $12,57 \text{ mm}^2$  se tedy jedná o pokles cca  $3 \text{ mm}^2$ . Oproti tomu ocel S 690 dosahuje v případě výrazných korozi (jako je u této oceli 9 denní koroze v solné mlze a koroze v exteriéru) celkové plochy až  $11 \text{ mm}^2$ , a tedy v těchto případech docházelo k méně výrazné deformaci původního tvaru.

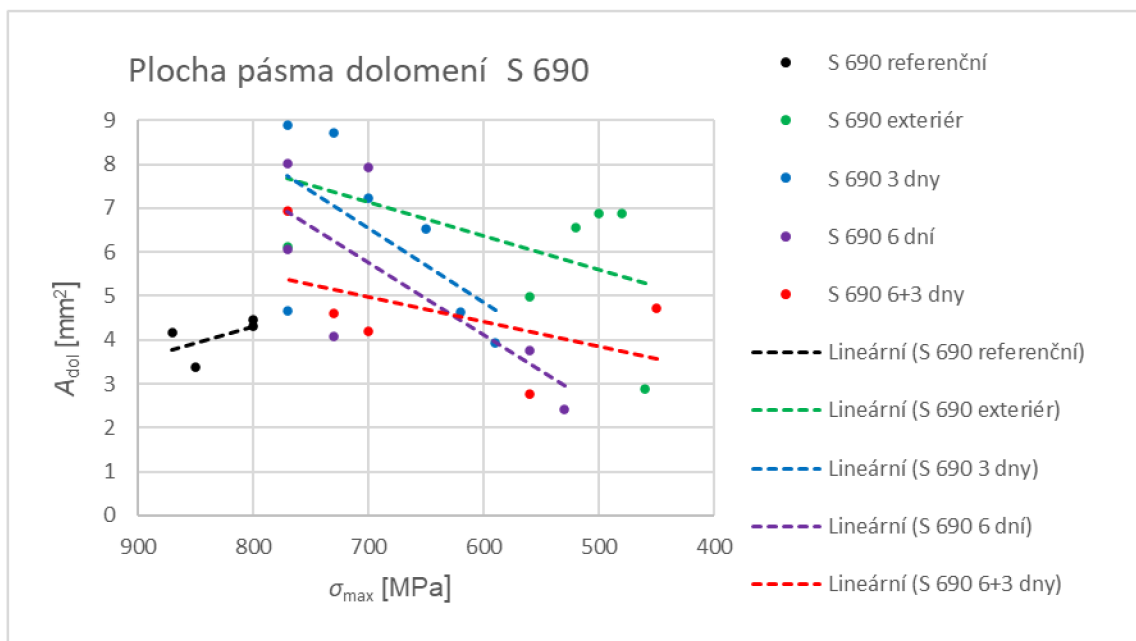
Pásma urychleného rozvoje únavových trhlin (graf na obr. 7.24) mají obdobný trend se zvětšující se plochou při snižujícím se napětí jako u předchozí oceli. Co je ale rozdílné, je chování ploch pásma dolomu. Pro referenční ocel zůstává plocha dolomu vcelku konstantní pro všechny vzorky (podobně jako u oceli S 460), oproti tomu ale u korodovaných vzorků došlo k výraznému rozptylu hodnot ploch vzhledem ke způsobu, kterým byl vzorek vystaven korozi. Stále je patrný trend klesající plochy pásma dolomu v závislosti na klesajícím napětí, rozdíly mezi plochami při stejném napětí však dosahují i  $2 \text{ mm}^2$ , viz graf na obr. 7.25.



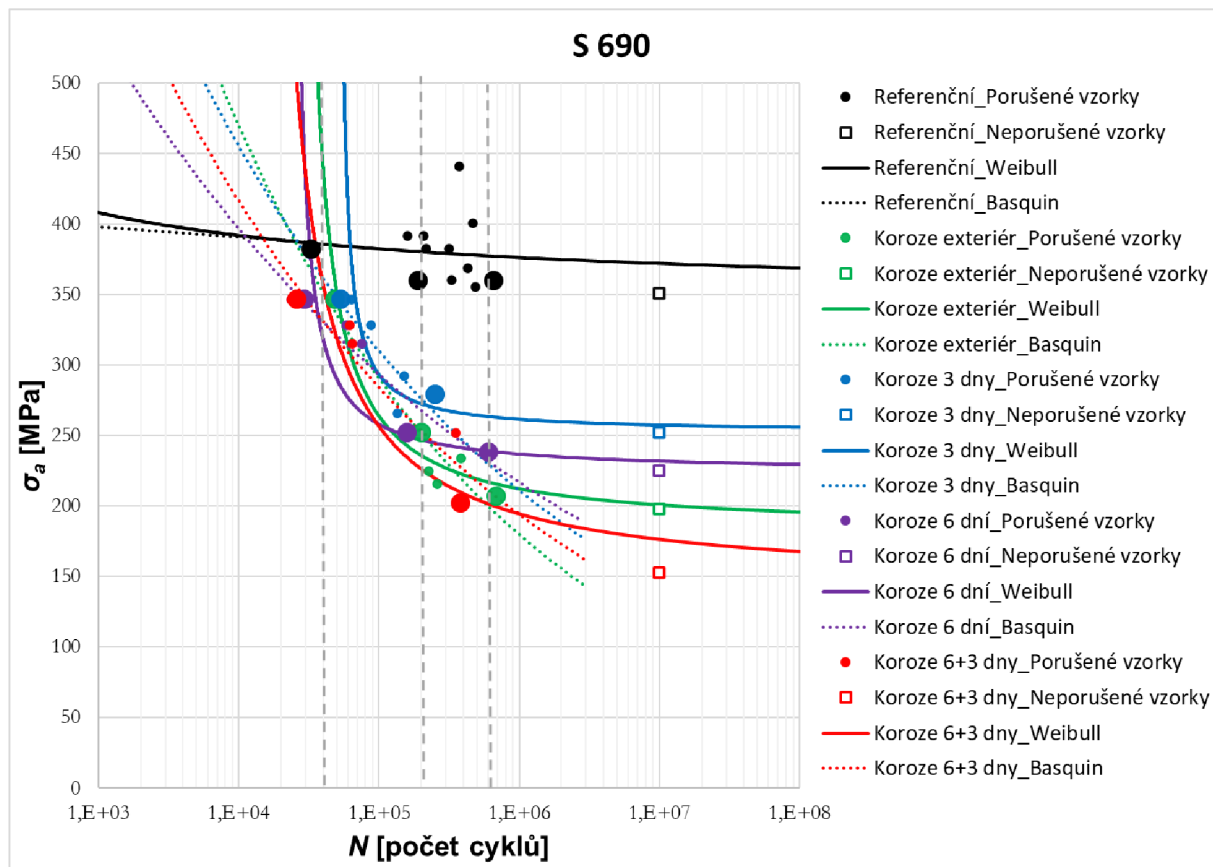
Obr. 7.23: Graf závislosti celkové plochy lomu oceli S 690 na maximálním napětí porušených vzorků.



Obr. 7.24: Graf závislosti plochy pásma urychleného rozvoje oceli S 690 na maximálním napětí porušených vzorků.



Obr. 7.25: Graf závislosti plochy pásma dolomení oceli S 690 na maximálním napětí porušených vzorků.

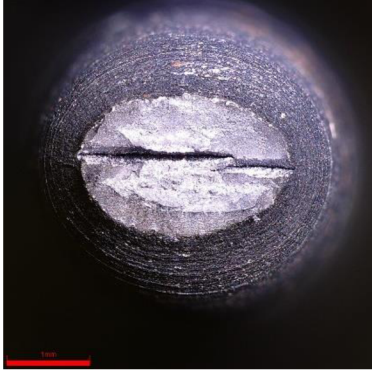
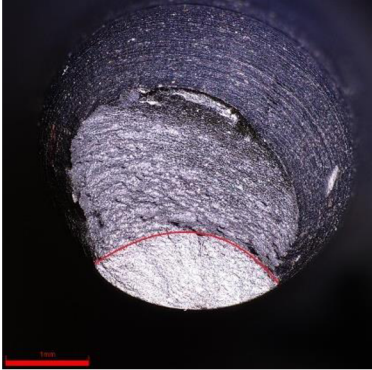
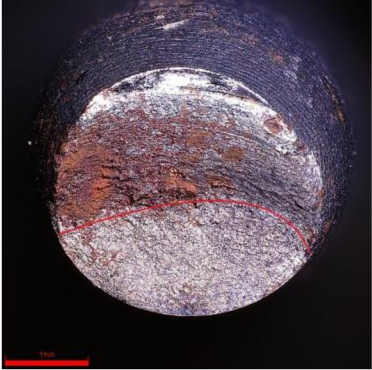


Obr. 7.26: Graf únavových modelů oceli S 690 se zvýrazněnými vzorky vyskytující se v pozorovaných oblastech

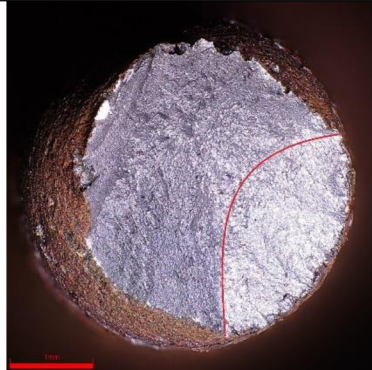
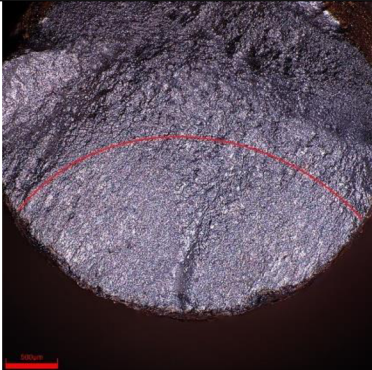
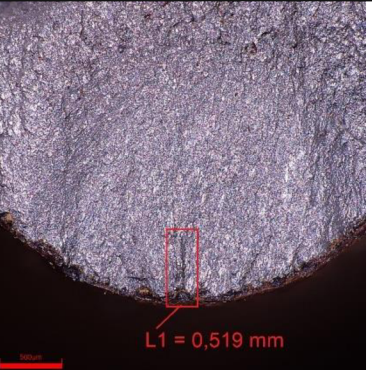
Z fotografií lomových ploch níže můžeme vidět, že pro ocel vyšší pevnosti nejsou již výrazné trhliny tolik časté, jako jsme to viděli u oceli S 460. Celkově se jejich počet snížil a svoji velikostí dosahují mnohem menších hodnot.

Zpravidla se jedná o pár kratších trhlin s délkou do 0,26 mm u ocelí, které byly vystaveny delší době solné mlže a zatěžovány byly vysokým napětím, viz obrázky 7.35 a 7.38. Výjimku tvoří vzorek korodovaný v exteriéru (obrázek 7.32) s marginální trhlinou délky 0,519 mm. To mohlo být způsobeno výrazným koncentrátorem napětí na povrchu, vytvořeného právě korodováním, od kterého se následně trhlina začala šířit.

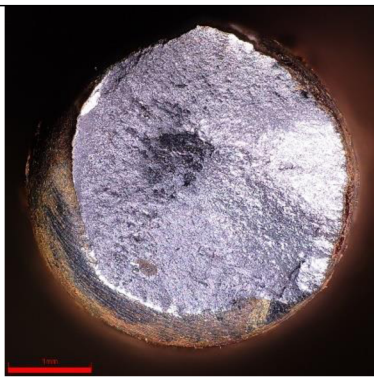
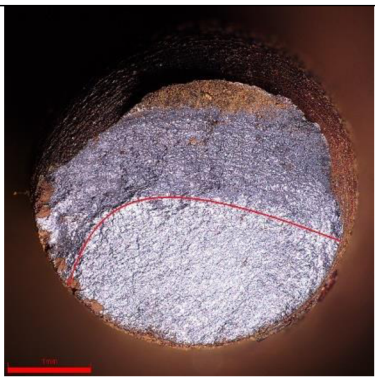
### S 690 referenční

$N = 33\ 000$ $\sigma_{max} = 850\ \text{MPa}$ $\sigma_a = 382,5\ \text{MPa}$	$N = 191\ 000$ $\sigma_{max} = 800\ \text{MPa}$ $\sigma_a = 360\ \text{MPa}$	$N = 653\ 600$ $\sigma_{max} = 800\ \text{MPa}$ $\sigma_a = 360\ \text{MPa}$
		
<p><i>Obr. 7.27: Fotografie lomové plochy oceli S 690 referenční, vzorek č. 15</i></p>	<p><i>Obr. 7.28: Fotografie lomové plochy oceli S 690 referenční, vzorek č. 16</i></p>	<p><i>Obr. 7.29: Fotografie lomové plochy oceli S 690 referenční, vzorek č. 5</i></p>
$A_{celk} = 3,387\ \text{mm}^2$ $L_{max} = 1,811\ \text{mm}$	$A_{celk} = 5,731\ \text{mm}^2$ $A_{roz} = 1,421\ \text{mm}^2$	$A_{celk} = 7,515\ \text{mm}^2$ $A_{roz} = 3,049\ \text{mm}^2$

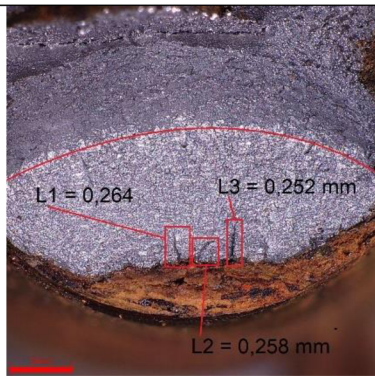
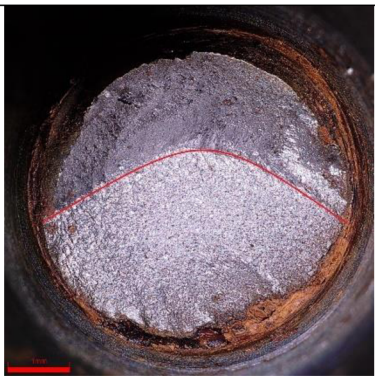
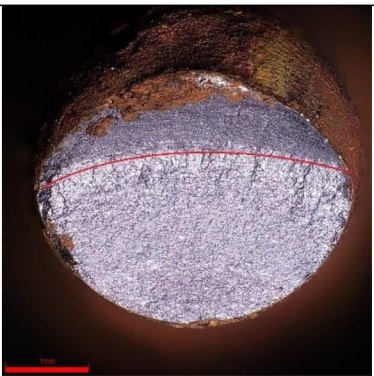
### S 690 exteriér

$N = 50\ 492$ $\sigma_{max} = 770\ \text{MPa}$ $\sigma_a = 346,5\ \text{MPa}$	$N = 200\ 394$ $\sigma_{max} = 560\ \text{MPa}$ $\sigma_a = 252\ \text{MPa}$	$N = 685\ 000$ $\sigma_{max} = 460\ \text{MPa}$ $\sigma_a = 207\ \text{MPa}$
		
<p><i>Obr. 7.30: Fotografie lomové plochy oceli S 690 koroze v exteriéru, vzorek č. 1</i></p>	<p><i>Obr. 7.31: Fotografie lomové plochy oceli S 690 koroze v exteriéru, vzorek č. 2</i></p>	<p><i>Obr. 7.32: Fotografie lomové plochy oceli S 690 koroze v exteriéru, vzorek č. 7</i></p>
$A_{celk} = 8,505\ \text{mm}^2$ $A_{roz} = 2,373\ \text{mm}^2$	$A_{celk} = 10,185\ \text{mm}^2$ $A_{roz} = 5,204\ \text{mm}^2$	$A_{celk} = 10,618\ \text{mm}^2$ $A_{roz} = 7,733\ \text{mm}^2$ $L_{max} = 0,519\ \text{mm}$

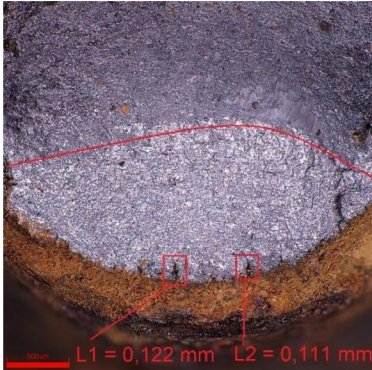
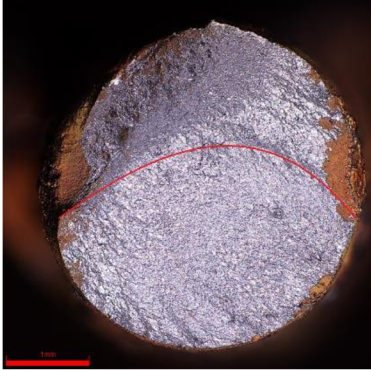
### S 690 3 dny

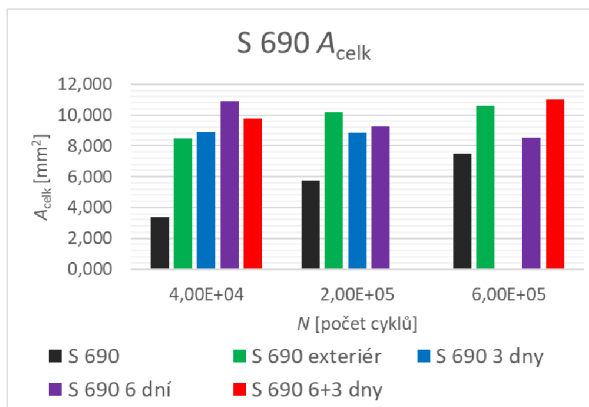
$N = 53\,318$ $\sigma_{max} = 770\text{ MPa}$ $\sigma_a = 346,5\text{ MPa}$	$N = 251\,878$ $\sigma_{max} = 620\text{ MPa}$ $\sigma_a = 279\text{ MPa}$	
		
<p><i>Obr. 7.33: Fotografie lomové plochy oceli S 690 korodované 3 dny, vzorek č. 1</i></p>	<p><i>Obr. 7.34: Fotografie lomové plochy oceli S 690 korodované 3 dny, vzorek č. 6</i></p>	
$A_{celk} = 8,902\text{ mm}^2$	$A_{celk} = 8,858\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 4,217\text{ mm}^2$	

### S 690 6 dní

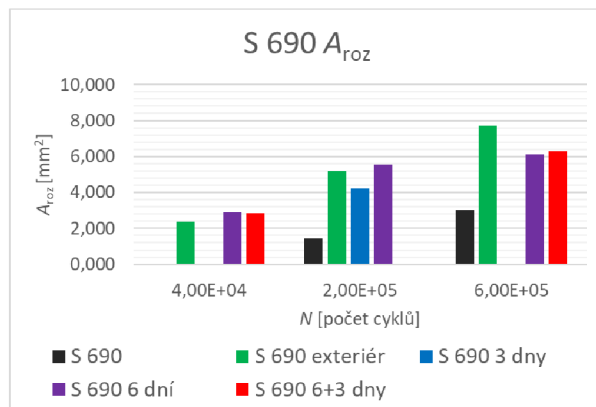
$N = 29\,367$ $\sigma_{max} = 770\text{ MPa}$ $\sigma_a = 346,5\text{ MPa}$	$N = 159\,639$ $\sigma_{max} = 560\text{ MPa}$ $\sigma_a = 252\text{ MPa}$	$N = 601\,110$ $\sigma_{max} = 530\text{ MPa}$ $\sigma_a = 238,5\text{ MPa}$
		
<p><i>Obr. 7.35: Fotografie lomové plochy oceli S 690 korodované 6 dní, vzorek č. 10</i></p>	<p><i>Obr. 7.36: Fotografie lomové plochy oceli S 690 korodované 6 dní, vzorek č. 2</i></p>	<p><i>Obr. 7.37: Fotografie lomové plochy oceli S 690 korodované 6 dní, vzorek č. 5</i></p>
$A_{celk} = 10,891\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 2,882\text{ mm}^2$ $L_{max} = 0,264\text{ mm}$	$A_{celk} = 9,282\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 5,536\text{ mm}^2$	$A_{celk} = 8,545\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 6,139\text{ mm}^2$

## S 690 6+3 dny

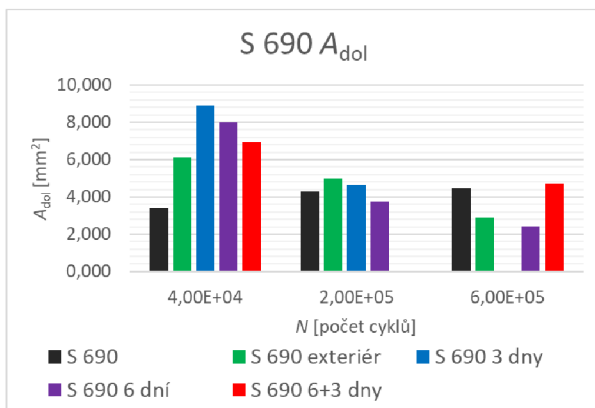
$N = 26\ 043$ $\sigma_{max} = 770\ \text{MPa}$ $\sigma_a = 346,5\ \text{MPa}$		$N = 379\ 670$ $\sigma_{max} = 450\ \text{MPa}$ $\sigma_a = 202,5\ \text{MPa}$
 <p>Obr. 7.38: Fotografie lomové plochy oceli S 690 korodované 9 dní, vzorek č. 10</p>		 <p>Obr. 7.39: Fotografie lomové plochy oceli S 690 korodované 9 dní, vzorek č. 5</p>
$A_{celk} = 9,779\ \text{mm}^2$ $A_{roz} = 2,851\ \text{mm}^2$ $L_{max} = 0,122\ \text{mm}$		$A_{celk} = 11,033\ \text{mm}^2$ $A_{roz} = 6,297\ \text{mm}^2$



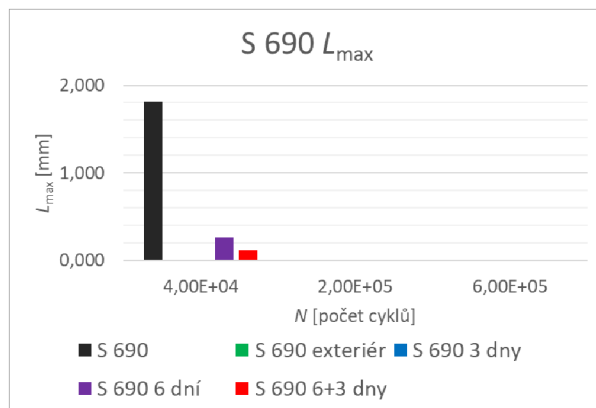
Obr. 7.40: Graf celkových lomových ploch vzorků pozorovaných oblastí oceli S 690



Obr. 7.41: Graf plochy pásma urychleného rozvoje lomu vzorků pozorovaných oblastí oceli S 690



Obr. 7.42: Graf plochy pásma dolomení vzorků pozorovaných oblastí oceli S 690

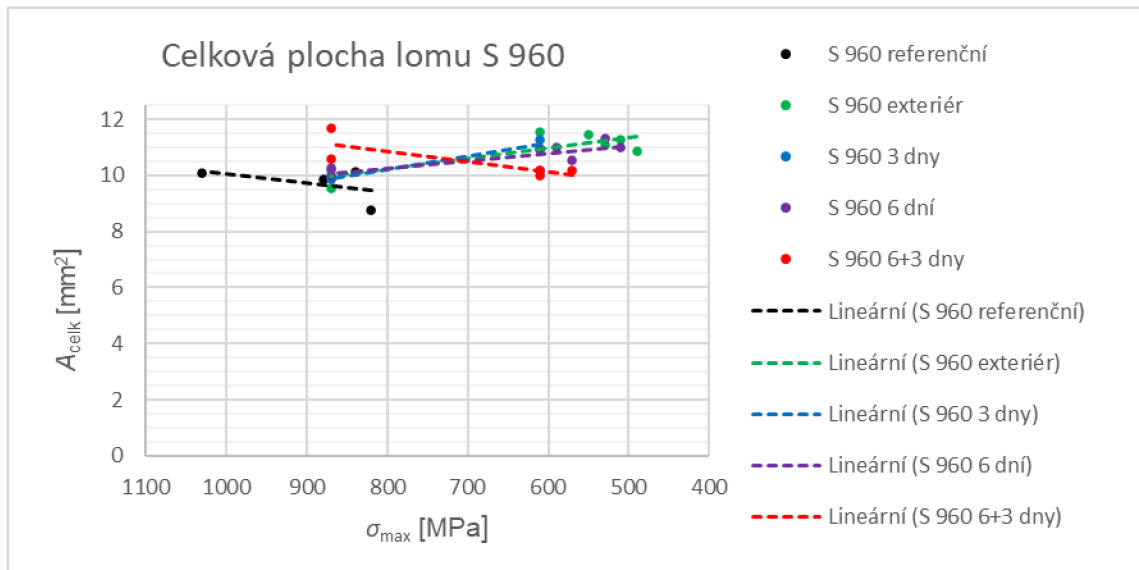


Obr. 7.43: Graf délky největší trhliny vzorků pozorovaných oblastí oceli S 690

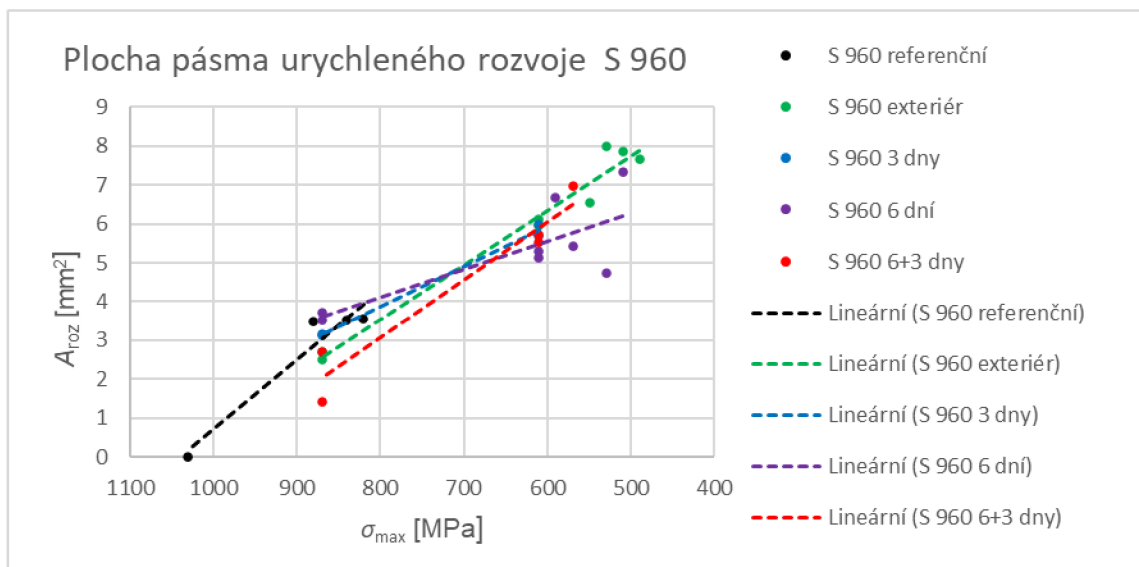
### 7.3. S 960

Oproti předchozím případům ocelí S 460 a S 690 je z grafu na obrázku 7.44 vidět, že celková lomová plocha vzorků oceli S 960 zůstává relativně konstantní vzhledem k napětí. To, co se však mění je poměr mezi plochou pásma urychleného rozvoje a plochou dolomení. Pokud porovnáme grafy na obrázcích 7.45 a 7.46 uvidíme, že bez rozdílu na způsobu koroze dochází k lineárnímu nárůstu plochy urychleného rozvoje lomu a zároveň ke stejnému velkému poklesu v ploše dolomení.

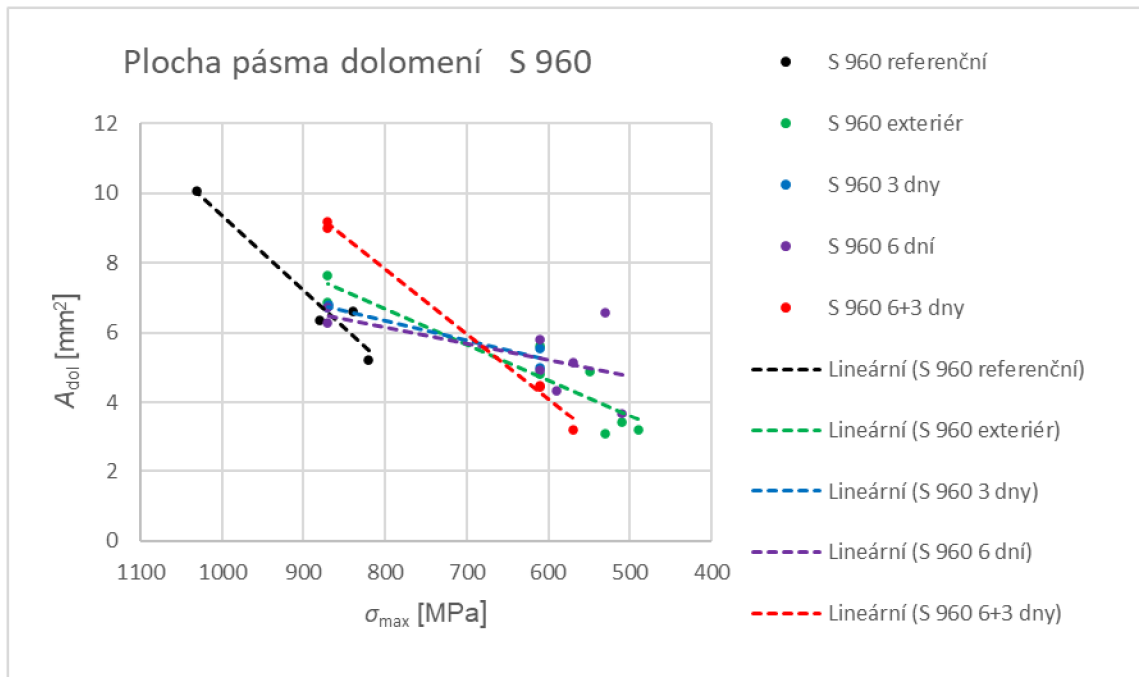
Stejně tak i tvorba „krčků“ není tak výrazná. Pokud se podíváme na hodnoty celkových lomových ploch pohybují se zpravidla mezi 10 až 12 mm<sup>2</sup>. Tvar vzorku se tedy při porušení příliš nedeformuje.



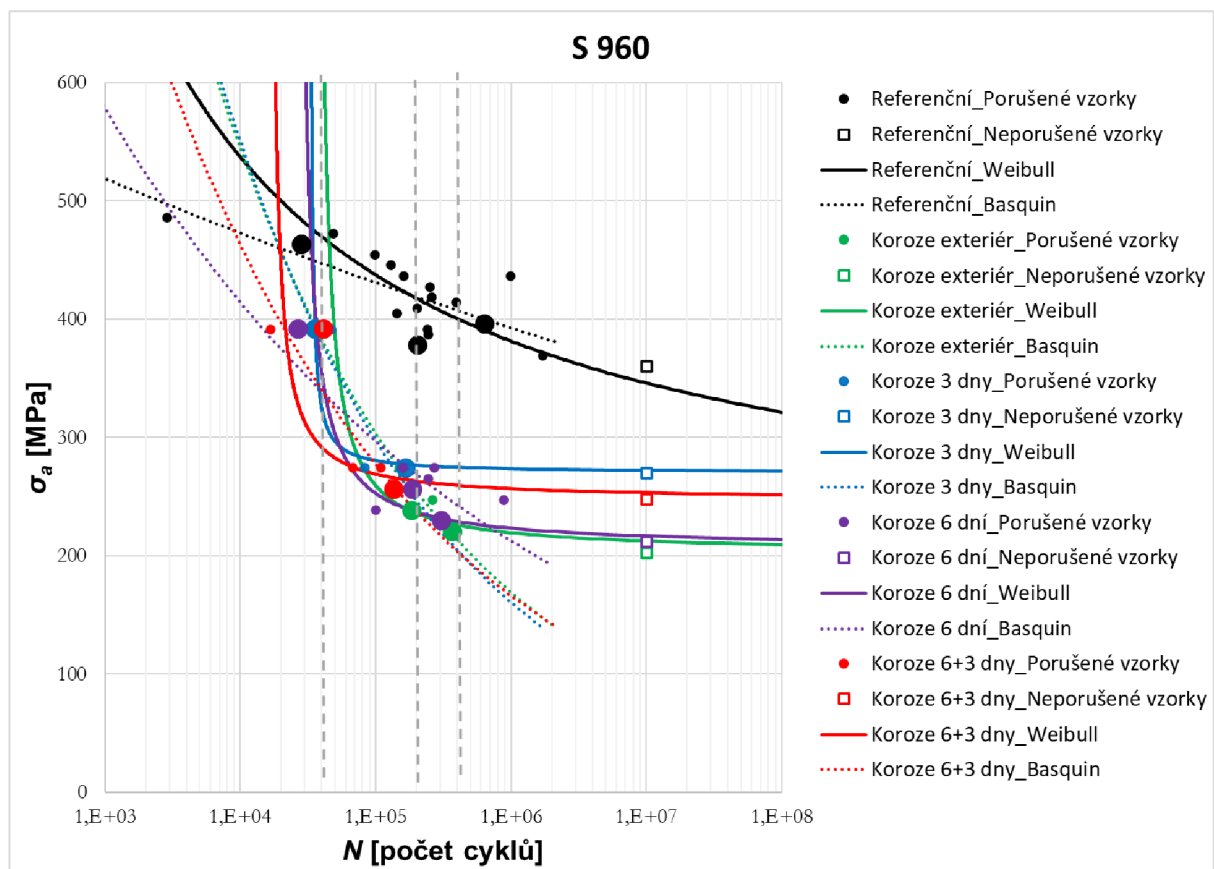
Obr. 7.44: Graf závislosti celkové plochy lomu oceli S 960 na maximálním napětí porušených vzorků.



Obr. 7.45: Graf závislosti plochy pásma urychleného rozvoje oceli S 960 na maximálním napětí porušených vzorků.



Obr. 7.46: Graf závislosti plochy pásma dolomení oceli S 960 na maximálním napětí porušených vzorků.



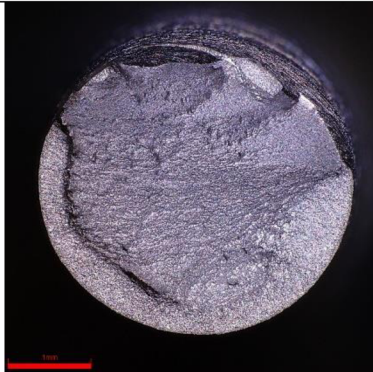
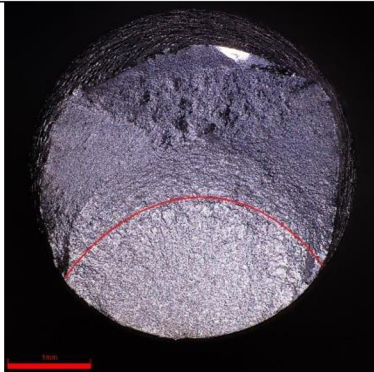
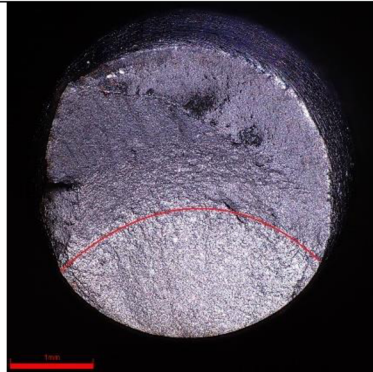
Obr. 7.47: Graf únavových modelů oceli S 960 se zvýrazněnými vzorky vyskytující se v pozorovaných oblastech



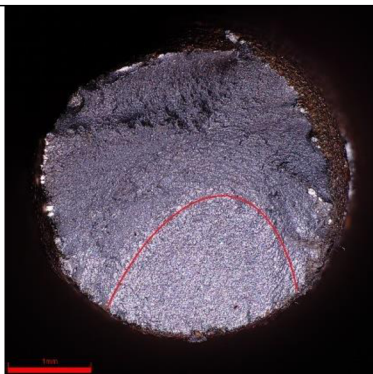


Malé deformování tvaru vzorku je patrné také z fotografií lomových ploch oceli S 960 níže. Tvar lomové plochy má tendenci zůstat kruhový a také zužování vzorku při dolomu je menší.

Samotné trhliny se u sledovaných vzorků téměř nevyskytovaly. Jedinou výjimkou byl vzorek vystavený 9 dnům solné mlže, který obsahoval jednu marginální trhlinu délky 0,425 mm viz obrázek 7.59.

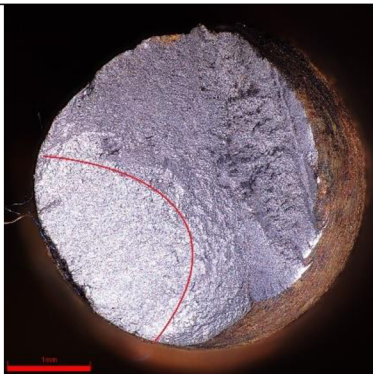
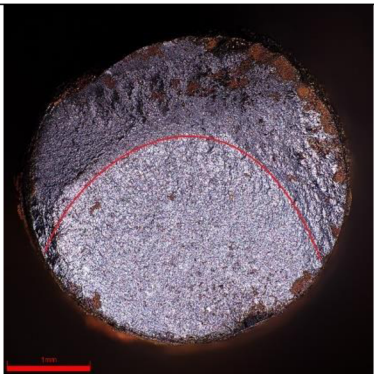
### S 960 referenční

$N = 28\ 403$ $\sigma_{max} = 1030\ \text{MPa}$ $\sigma_a = 463,5\ \text{MPa}$	$N = 203\ 851$ $\sigma_{max} = 840\ \text{MPa}$ $\sigma_a = 378\ \text{MPa}$	$N = 639\ 992$ $\sigma_{max} = 880\ \text{MPa}$ $\sigma_a = 396\ \text{MPa}$
		
<p><i>Obr. 7.48: Fotografie lomové plochy oceli S 960 referenční, vzorek č. 3</i></p>	<p><i>Obr. 7.49: Fotografie lomové plochy oceli S 960 referenční, vzorek č. 20</i></p>	<p><i>Obr. 7.50: Fotografie lomové plochy oceli S 960 referenční, vzorek č. 17</i></p>
$A_{celk} = 10,060\ \text{mm}^2$	$A_{celk} = 10,131\ \text{mm}^2$ $A_{roz} = 3,514\ \text{mm}^2$	$A_{celk} = 9,834\ \text{mm}^2$ $A_{roz} = 3,496\ \text{mm}^2$

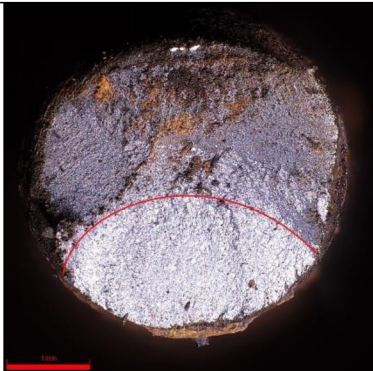
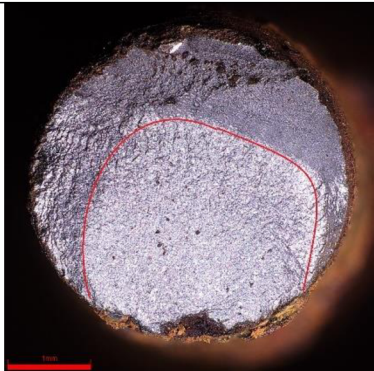
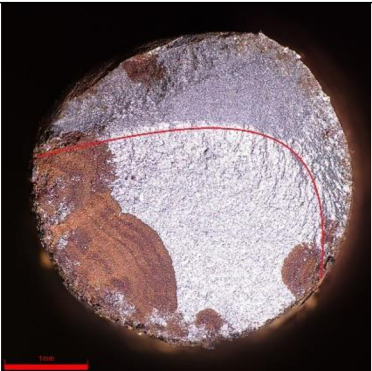
### S 960 exteriér

$N = 36\,017$ $\sigma_{max} = 870\text{ MPa}$ $\sigma_a = 391,5\text{ MPa}$	$N = 185\,622$ $\sigma_{max} = 530\text{ MPa}$ $\sigma_a = 238,5\text{ MPa}$	$N = 370\,628$ $\sigma_{max} = 490\text{ MPa}$ $\sigma_a = 220,5\text{ MPa}$
		
<p><i>Obr. 7.51: Fotografie lomové plochy oceli S 960 koroze v exteriéru, vzorek č. 10</i></p>	<p><i>Obr. 7.52: Fotografie lomové plochy oceli S 960 koroze v exteriéru, vzorek č. 4</i></p>	<p><i>Obr. 7.53: Fotografie lomové plochy oceli S 960 koroze v exteriéru, vzorek č. 7</i></p>
$A_{celk} = 9,546\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 2,699\text{ mm}^2$	$A_{celk} = 11,076\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 7,987\text{ mm}^2$	$A_{celk} = 10,880\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 7,671\text{ mm}^2$

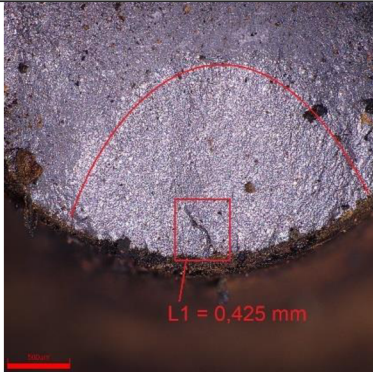

### S 960 3 dny

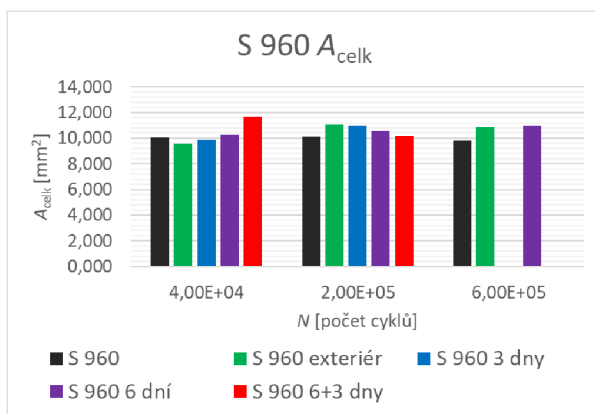
$N = 35\,464$ $\sigma_{max} = 870\text{ MPa}$ $\sigma_a = 391,5\text{ MPa}$	$N = 167\,209$ $\sigma_{max} = 610\text{ MPa}$ $\sigma_a = 247\text{ MPa}$	
		
<p><i>Obr. 7.54: Fotografie lomové plochy oceli S 960 korodované 3 dny, vzorek č. 1</i></p>	<p><i>Obr. 7.55: Fotografie lomové plochy oceli S 960 korodované 3 dny, vzorek č. 2</i></p>	
$A_{celk} = 9,846\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 3,128\text{ mm}^2$	$A_{celk} = 10,969\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 5,994\text{ mm}^2$	

### S 960 6 dní

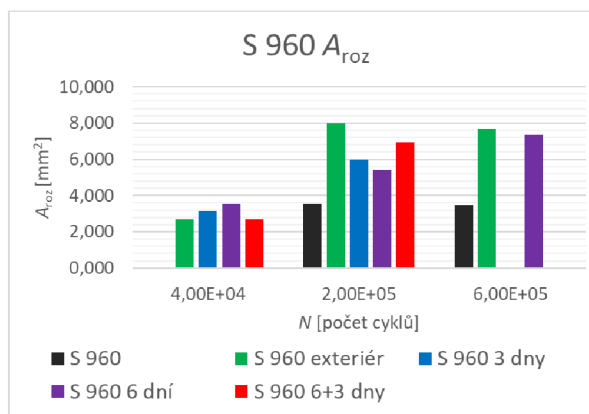
$N = 26\,755$ $\sigma_{max} = 870\text{ MPa}$ $\sigma_a = 391,5\text{ MPa}$	$N = 187\,382$ $\sigma_{max} = 570\text{ MPa}$ $\sigma_a = 256,5\text{ MPa}$	$N = 304\,684$ $\sigma_{max} = 510\text{ MPa}$ $\sigma_a = 229,5\text{ MPa}$
		
<p>Obr. 7.56: Fotografie lomové plochy oceli S 960 korodované 6 dní, vzorek č. 10</p>	<p>Obr. 7.57: Fotografie lomové plochy oceli S 960 korodované 6 dní, vzorek č. 5</p>	<p>Obr. 7.58: Fotografie lomové plochy oceli S 960 korodované 6 dní, vzorek č. 8</p>
$A_{celk} = 10,260\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 3,538\text{ mm}^2$	$A_{celk} = 10,559\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 5,427\text{ mm}^2$	$A_{celk} = 11,009\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 7,347\text{ mm}^2$

### S 960 6+3 dny

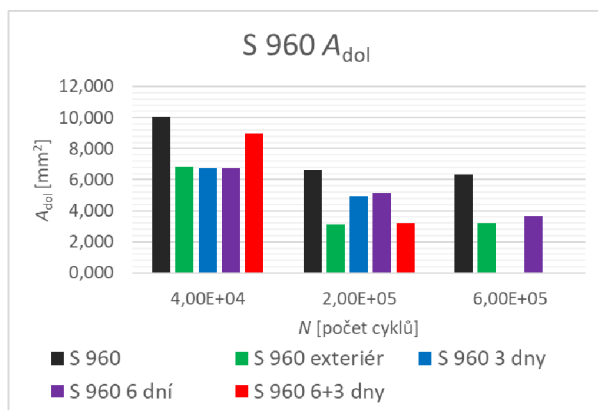
$N = 41\,491$ $\sigma_{max} = 870\text{ MPa}$ $\sigma_a = 391,5\text{ MPa}$	$N = 137\,284$ $\sigma_{max} = 570\text{ MPa}$ $\sigma_a = 256,5\text{ MPa}$	
		
<p>Obr. 7.59: Fotografie lomové plochy oceli S 960 korodované 9 dní, vzorek č. 10</p>	<p>Obr. 7.60: Fotografie lomové plochy oceli S 960 korodované 9 dní, vzorek č. 5</p>	
$A_{celk} = 11,685\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 2,686\text{ mm}^2$ $L_{max} = 0,425\text{ mm}$	$A_{celk} = 10,172\text{ mm}^2$ $A_{roz} = 6,963\text{ mm}^2$	



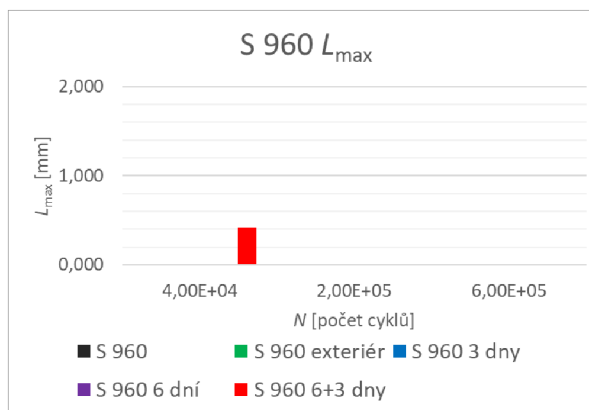
Obr. 7.61: Graf celkových lomových ploch vzorků pozorovaných oblastí oceli S 960



Obr. 7.62: Graf plochy pásma urychleného rozvoje lomu vzorků pozorovaných oblastí oceli S 960



Obr. 7.63: Graf plochy pásma dolomení vzorků pozorovaných oblastí oceli S 960



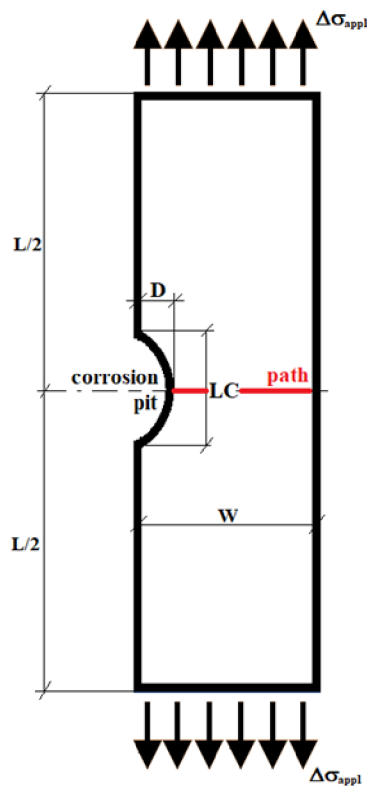
Obr. 7.64: Graf délky největší trhliny vzorků pozorovaných oblastí oceli S 960

## 8. Využití dat z experimentů pro výpočty v programu ANSYS

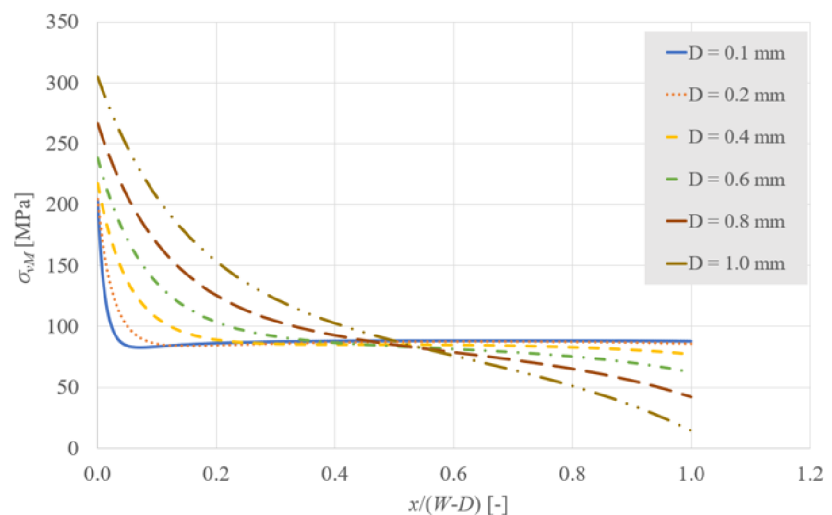
Z výsledků experimentů a vyhodnocených dat této diplomové práce byl následně pod vedením Ing. Lucie Malíkové Ph.D., napsán článek o „Koncentraci napětí v korozní prohlubni“ [29]. Tento článek se zabývá rozložením napětí, při cyklickém namáhání, pokud vzorek obsahuje korozní prohlubeň kruhového tvaru. Simulace byly prováděny metodou konečných prvků a hlavním výsledkem byl faktor koncentrace napětí  $K_t$  pro různé velikosti korozní prohlubně.

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{avg}}, \quad (49)$$

kde  $\sigma_{max}$  představuje maximální hodnotu napětí (vyskytující se na dně korozní prohlubně) a  $\sigma_{avg}$  představuje průměrnou hodnotu napětí (podél průřezu před korozní prohlubní, označeno červeně na obr. 8.1). [29]



Obr. 8.1: Schéma analyzovaného obdélníkového vzorku s korozní prohlubní vystavenou cyklickému namáhání v tahu [29]



Obr. 8.2: Vybrané výsledky rozložení napětí podél dráhy překrývající šířku vzorku před korozní prohlubní pro různé hloubky korozní prohlubně ( $D$  mezi 0,1 a 1,0 mm) [29]

V tabulce 8.1 jsou uvedeny hodnoty maximálního a průměrného von Misesova napětí spolu s odpovídajícím faktorem koncentrace napětí a jeho procentuálním rozdílem pro zvětšující se velikost korozní prohlubně. [29]

Tab. 8.1: Hodnoty maximálního a průměrného von Misesova napětí spolu s odpovídajícím faktorem koncentrace napětí a jeho procentuálním rozdílem pro zvětšující se hloubku korozní prohlubně ( $D = 0,1$  až  $1,0$  mm). [29]

$D$ [mm]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{avg}$ [MPa]	$K_t$ [-]	$(K_t - K_{t,D=0.1mm})/K_{t,D=0.1mm}$ [%]
0.1	202.47	88.84	2.28	-
0.2	204.71	89.18	2.30	0.72
0.3	210.72	89.97	2.34	2.76
0.4	217.67	91.11	2.39	4.83
0.5	228.46	92.74	2.46	7.89
0.6	238.11	94.47	2.52	10.59
0.7	251.55	96.68	2.60	14.17
0.8	266.68	99.16	2.69	18.00
0.9	284.70	102.02	2.79	22.44
1.0	304.92	105.14	2.90	27.25

Poznatky plynoucí z tohoto článku: [29]

- Čím hlubší je korozní prohlubeň, tím vyšší jsou hodnoty zkoumaného napětí před prohlubní, jak maximálního, tak i průměrného.
- Poměr mezi maximální a průměrnou hodnotou (faktor koncentrace napětí  $K_t$ ) vypočítaný pro von Misesova napětí se zvyšuje s rostoucí hloubkou korozní prohlubně. Při zvětšení prohlubně desetinásobně, se zvýší faktor koncentrace napětí zhruba o 27 %.
- To znamená, že míra koroze ovlivňuje rozložení napětí ve vzorku či konstrukci a následně může ovlivnit i její životnost.

Kromě článku [29] byly vyhotoveny i další články zabývající se tímto tématem a to [30], [31] a [32].

## 9. Závěr

Vliv koroze na únavové chování je u všech testovaných ocelí evidentní. Z grafu, který je na obr. 5.6, a který popisuje únavové chování oceli S 460, je vidět, že dochází k poklesu únosnosti postupně. Pokud budeme předpokládat, že šíření koroze v materiálu je lineární a víme, že vzorky z exteriéru byly vystaveny vlivům vnějšího prostředí po dobu jednoho roku, můžeme předpokládat, že 3 dny v solné mlze odpovídají době delší, než je jeden rok. 6 dní v solné mlze by pravděpodobně mohly být 2 roky a 9 denní umělá koroze i doba delší než 3 roky.

Tato reakce oceli na umělou korozi však není stejná u ostatních dvou ocelí. U oceli S 690 vychází doba 1 roku v exteriéru mezi 6 až 9 dny v solné mlze, chování vzorků, které byly vystaveny solné mlze 3 dny v tomto případě tedy vystihuje dobu, která je výrazně kratší než 1 rok. Obdobně je tomu i u oceli S 960, kdy době jednoho roku v exteriéru odpovídá umělá koroze solnou mlhou po dobu 6 dní. Dá se tedy říct, že oceli vyšších pevností (S 690 a S 960) jsou na vznik koroze více náchylné než ocel S 460, jelikož po stejné době strávené v exteriéru odpovídá korozní degradace vzorků ocelí vyšších pevností delší době strávené v solné mlze, než je tomu u oceli S 460.

Je však třeba podotknout, že všechny druhy ocelí byly testovány bez jakékoliv korozivzdorné ochrany (např. bez nátěru či povlaku). V praxi, ve většině konstrukcí, které obsahují ocelové části, bývají tyto ošetřeny například nátěrem nebo třeba povlakem, který korozi brání a prodlužuje životnost. Popřípadě se používají korozivzdorné oceli [33], nebo oceli typu Weathering steel (Atmofix) [34, 35].

Co je však u zvyšující se pevnosti oceli jev, který může být nebezpečný, je procentuální pokles únavové únosnosti při korozi. Oproti oceli S 460, kde je pokles postupný, dochází u ocelí S 690 a S 960 k velkému spádu v momentě, kdy se koroze začne vyskytovat. Pokud porovnáme například procentuální pokles únosnosti vzorků z exteriéru, kdy pro S 460 je to okolo 12 %, pro S 690 a S 960 už je to v průměru přes 40 %.

Tyto značné ztráty mohou být způsobeny tím, že se zvyšující se pevností jsou oceli méně odolné vůči koncentrátorům napětí. Stačí pak i malé nerovnosti, způsobené korozí, aby se začaly šířit únavové trhliny a došlo poté k lomu vzorku.

Další možnou nevýhodou ocelí vyšších pevností je, jak jsme mohli vidět z pozorování lomových ploch, absence trhlín při únavovém namáhání a jen velmi malá změna průměru, při porušení vzorku. Změna tvaru a tvorba trhlín, jsou potencionální indikátory možného nebezpečí kolapsu konstrukce. Díky tomu jsme schopni například včas zahájit evakuaci, či zavést opatření o omezeném režimu a konstrukci zabezpečit a zpevnit ještě před případným zřícením. Bez těchto ukazatelů, by bylo třeba dbát zvýšené péče a preciznosti, při kontrolách konstrukcí, případně zvážit větší četnost kontrol.

Obecně se tedy dá říct, že použití vysokopevnostních ocelí má nesporné výhody a pozitiva, která vybízí k jejich využití. Je však třeba znát rizika a případné změny chování oproti ocelím běžných pevností a s těmito omezeními počítat a navrhovat konstrukce tak, aby vyhovovaly ve všech fázích životnosti.

## **9.1. Možnost dalšího postupu**

Jedna z možností, kterou by se výzkum mohl dále zabývat, jsou jiné druhy korozivního prostředí. Vysokopevnostní ocel se zatím používá převážně ve strojírenství. Zde mohou být rozmanité druhy prostředí, ve kterých mohou být konstrukce či součástky namáhány. Jednalo by se spíše už o specifitější výzkum třeba i pro konkrétní zadání prostředí a problematiky, která se má řešit.

Kromě agresivity prostředí může být ocel vystavena i velkým změnám teplot, například pokud se konstrukce vyskytuje ve vysokých nadmořských podmínkách, nebo v moři. I tyto podmínky mohou mít neblahý vliv na vlastnosti oceli.



## Zdroje

- [1] DOLEJŠ, J. *Vysokopevnostní oceli pro stavební konstrukce* [online]. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 30 s. [cit. 2023-11-24]. Dostupné z: <https://portal.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/04/HP2013-04-Dolejs.pdf>
- [2] GUO, H., H. WEI, G. LI a F. SUN. Experimental research on fatigue performance of butt welds of corroded Q690 high strength steel. *Journal of Constructional Steel Research* [online]. September 2021, (Vol. 184) [cit. 2023-11-24]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106801>
- [3] YUE, Y., S. GAO, N. LI a R. ZHANG. High-cycle fatigue performance of corroded Q690E high strength steel and Q690qENH high-strength weathering steel. *Construction and Building Materials* [online]. 19 October 2023n. l., (Vol. 401) [cit. 2023-11-24]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132835>
- [4] JIANG, Ch., Ch. WU a X. JIANG. Experimental study on fatigue performance of corroded high-strength steel wires used in bridges. *Construction and Building Materials* [online]. 30 October 2018n. l., (Vol. 187), 681-690 [cit. 2023-11-24]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.249>
- [5] GUO, X., X. LIU, G. LONG, Y. ZHAO a Y. YUAN. Data-driven prediction of the fatigue performance of corroded high-strength steel wires. *Engineering Failure Analysis* [online]. April 2023, (Vol. 146) [cit. 2023-11-24]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107108>
- [6] *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty* [online]. Leden 2021 [cit. 2023-11-24]. ČSN EN ISO 6892-1
- [7] ROVNANÍKOVÁ, P., ROVNANÍK, P. a MALÁ, J. *Stavební chemie: Degradace stavebních materiálů a chemie kovů*. 2. Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-7204-902-8
- [8] TULKA, J. *Ochrana materiálů proti vlivům prostředí (teorie a metody)*. 1. Brno: VUTIUM, 2021, 239 s. ISBN 978-80-214-5879-6.
- [9] *Korozní zkoušky v umělých atmosférách – Zkoušky solnou mlhou*. Prosinec 2017. [cit. 2023-11-24] ČSN EN ISO 9227
- [10] KLESNIL, M. a P. LUKÁŠ. *Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání*. Praha: Československá akademie věd, 1975, 224 s.
- [11] PANTĚLEJEV, L. *Únava kovových materiálů* [online]. 2013, 31 s. [cit. 2023-11-24]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/ukm/Unava%20kovovych%20materialu.pdf>
- [12] ŠIMONOVÁ, H. *Stanovení únavových charakteristik betonu s využitím lomověmechanických parametrů*. Brno, 2013. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Ústav stavební mechaniky. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=186940](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=186940)
- [13] KOZÁKOVÁ, K. *Vliv vrubů při cyklickém vysokofrekvenčním únavovém zatěžování*. Brno, 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Klusák, Ph.D.

- [14] ZAPLETAL, J. *Nízkocyklové a vysokocyklové únavové vlastnosti ADI*. Brno, 2011. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Stanislav Věchet, CSc.
- [15] KOHOUT, J. a S. VĚCHET. A new function for fatigue curves characterization and its multiple merits. *International Journal of Fatigue* [online]. 2001, (Vol. 23, 2), 175-183 [cit. 2023-11-24]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(00\)00082-7](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(00)00082-7)
- [16] GOEDEL, F., G. P. MEZZOMO a Z. M. CHAMBERLAIN PRAVIA. Fatigue lifespan of a fillet welded joint – Hybrid approach to obtain the S-N curve with a reduced number of tests. *Latin American Journal of Solids and Structures* [online]. September 2018 [cit. 2023-11-24]. Dostupné z: doi:10.1590/1679-78255194
- [17] BARBOSA, J. F., J. AFO CORREIA, RCS FREIRE JÚNIOR, S. ZHU a A. MP DE JESUS. Probabilistic S-N fields based on statistical distributions applied to metallic and composite materials: State of the art. *Advances in Mechanical Engineering* [online]. August 2019, (Vol. 11(8) 1–22) [cit. 2023-11-24]. Dostupné z: doi:10.1177/1687814019870395
- [18] CORREIA, J., N. APETRE, A. ARCARI, A. DE JESUS, M. MUÑIZ-CALVENTE, R. CALÇADA, F. BERTO a A. FERNÁNDEZ-CANTELI. Generalized probabilistic model allowing for various fatigue damage variables. *International Journal of Fatigue* [online]. July 2017, (Vol. 100, part 1), 187-194 [cit. 2023-11-24]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.03.031>
- [19] HASLWANTER, T. *An Introduction to Statistics with Python: With Applications in the Life Sciences*. Springer Cham, 2016. ISBN 978-3-319-28315-9.
- [20] NOVÁK, R. *Analýza spolehlivosti v oblasti IT*. České Budějovice, 2009. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce Ing. Ludvík Friebeľ, Ph.D.
- [21] PAUN, V. a V. PAUN. Weibull statistics application to the low cycle fatigue test of Zircaloy-4. U.P.B. Scientific Bulletin [online]. 2016, (Series A, Vol. 78, Iss. 2), 267-280 [cit. 2023-11-24]. ISSN 1223-7027. Dostupné z: [https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/full706\\_708902.pdf](https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full706_708902.pdf)
- [22] CASTILLO, E. a A. FERNÁNDEZ-CANTELI. *A Unified Statistical Methodology for Modeling Fatigue Damage*. Springer, 2009. ISBN 978-1-4020-9181-0.
- [23] CASTILLO E., FERNÁNDEZ-CANTELI A., PINTO H., LÓPEZ AENLLE M. A general regression model for statistical analysis of strain-life fatigue data. *Materials Letters*, 62, 3639-3642, 2008.
- [24] CASTILLO E., RAMOS A., KOLLER R., LÓPEZ AENLLE M., FERNÁNDEZ-CANTELI A. A critical comparison of two models for assessment of fatigue data Int. *Journal of Fatigue*, 30, 45-57, 2008.
- [25] Rezonanční pulsátor ZwickRoell Vibrophore 25-1200°C. In: *Ústav fyziky materiálů AV ČR, v. v. i.* [online]. [cit. 2023-11-28]. Dostupné z: <https://www.ipm.cz/vybaveni/rezonancni-pulsator-zwickroell-vibrophore-25-1200c>

- [26] PANTĚLEJEV, L. *Únava kovových materiálů* [online]. 2013, 31 s. [cit. 2023-11-24]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/ukm/Unava%20kovovych%20materialu.pdf>
- [27] SOBOLA, P. *Únavová odolnost extrudované Mg-slitiny AZ91E*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 58 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Libor Pantělejev, Ph.D.
- [28] PROCHÁZKA, R. *Vyhodnocování mechanických vlastností konstrukčních materiálů pomocí miniaturních zkušebních vzorků*. Plzeň, 2019. Dizertační práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, Fakulta Strojní. Vedoucí práce Prof. Ing. Ján Džugan, Ph.D.
- [29] MALÍKOVÁ, L., A. BENEŠOVÁ, M. AL KHAZALI, V. KŘIVÝ a S. SEITL. Stress concentration on a corrosion pit. *Section building structures & structural mechanics*. 2 December 2023n. I., (Vol. 23) DOI: (in press)
- [30] MALÍKOVÁ, L., A. BENEŠOVÁ, M. AL KHAZALI a S. SEITL. Fatigue behavior of high strength steels under various levels of corrosion. *Procedia Structural Integrity*. DOI: (in press)
- [31] MALÍKOVÁ, L., T. JUHÁSZOVÁ, P. DOUBEK, M. KREJSA a S. SEITL. Influence of a corrosion pit on behavior of a nearby crack. *AIP Conference Proceedings*. June 12. 2023, (Vol. 2848)
- [32] MALÍKOVÁ, L. a P. MIARKA, Fatigue crack propagation near a corrosion pit in a HSS specimen, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, (Vol. 129), 2024,104214, ISSN 0167-8442, doi: 10.1016/j.tafmec.2023.104214.
- [33] SEITL S., POKORNÝ P., BENEŠOVÁ A., JUHÁSZOVÁ T., KALA Z.: Variance of selected properties from various structural elements made from AISI 304. *Trans. VSB TU Ostrava Ser. 22* (2022) 39-44
- [34] KUNZ L., LUKÁŠ P., KLUSÁK J.: Fatigue Strength of Weathering Steel. *Materials Science* 18 (2012) 18-22 DOI: 10.5755/j01.ms.18.1.1335
- [35] URBAN V., V. KRIVÝ, M. KUBZOVA, Development of Corrosion Processes on Weathering Railway Bridge, *Procedia Engineering*, (Vol. 190), 2017, Pages 275-282, Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.338>

## Seznam obrázků

Obr. 1.1: Tahový diagram [6].....	14
Obr. 1.2: Schéma protažení vzorku během testu [6].....	14
Obr. 1.3: Tahový diagram oceli S 460 pro pět zkušebních těles.....	16
Obr. 1.4: Tahový diagram oceli S 690 pro pět zkušebních těles.....	17
Obr. 1.5: Tahový diagram oceli S 960 pro pět zkušebních těles.....	18
Obr. 2.1: Schéma elektrochemické koroze železa [7].....	19
Obr. 2.2: Schéma koroze bludnými proudy [7].....	20
Obr. 2.3: Rovnoměrná koroze [8].....	20
Obr. 2.4: Nerovnoměrné formy koroze [8].....	21
Obr. 2.5: Strukturní formy koroze [8].....	22
Obr. 3.1: Fotografie korozní komory.....	23
Obr. 3.2: Fotografie umístění vzorků v komoře.....	23
Obr. 3.3: Fotografie detailu uložení vzorků vystavených korozi.....	24
Obr. 3.4: Rozměry a geometrie ocelových vzorků vystavených korozi a únavovým zkouškám.....	24
Obr. 3.5: Graf porovnání smluvních mezí kluzu oceli S 460 v závislosti na druhu koroze.....	24
Obr. 3.6: Graf porovnání tažnosti oceli S 460 v závislosti na druhu koroze.....	24
Obr. 3.7: Graf porovnání smluvních mezí kluzu oceli S 690 v závislosti na druhu koroze.....	25
Obr. 3.8: Graf porovnání tažnosti oceli S 690 v závislosti na druhu koroze.....	25
Obr. 3.9: Graf porovnání smluvních mezí kluzu oceli S 960 v závislosti na druhu koroze.....	25
Obr. 3.10: Graf porovnání tažnosti oceli S 960 v závislosti na druhu koroze.....	25
Obr. 4.1: Schéma sinusové amplitudy napětí [13].....	26
Obr. 4.2: Rozdělení zátěžných cyklů [13].....	27
Obr. 4.3: Různé typy sinusových zátěžných cyklů [14].....	27
Obr. 4.4: Schéma průběhu křivky životnosti pro symetrický a nesymetrický cyklus zatěžování [13]....	28
Obr. 4.5: Schématické znázornění upravené Basquinovy křivky v log-log měřítku [16].....	30
Obr. 4.6: Grafické znázornění Kohout a Věchet křivky, v závislosti na oblasti počtu cyklů [15].....	31
Obr. 4.7: Grafické znázornění parametrů křivky [15].....	32
Obr. 4.8: Schematické znázornění modelu únavového selhání, zobrazující limit únavy [18].....	33
Obr. 4.9: Funkce hustoty pravděpodobnosti (PDF) s pravděpodobností nalezení hodnoty $x$ v intervalu mezi $a$ a $b$ [19].....	34
Obr. 4.10: Funkce hustoty pravděpodobnosti (vlevo) kumulativní rozdělení (vpravo) [19].....	35
Obr. 4.11: Vliv parametru měřítka $\delta$ a vliv parametru tvaru $\beta$ na tvar křivky [21].....	36
Obr. 5.1: Fotografie rezonančního pulsátoru ZwickRoell Vibrophore (vlevo) [25] a fotografie ocelových vzorků připravených na únavové testování (vpravo).....	37
Obr. 5.2: Bližší fotografie rezonančního pulsátoru ZwickRoell Vibrophore (vlevo) a detail upnutí ocelového vzorku do přístroje (vpravo).....	38
Obr. 5.3: Grafické znázornění únavového chování oceli S 460 Basquinovým modelem, modelem Kohouta a Věcheta a Weibullovým modelem. Graf referenční oceli (a), koroze v exteriéru (b), 3 dny (c), 6 dní (d) a 6+3 dny (e).....	40
Obr. 5.4: Grafické znázornění únavového chování oceli S 690 Basquinovým modelem, modelem Kohouta a Věcheta a Weibullovým modelem. Graf referenční oceli (a), koroze v exteriéru (b), 3 dny (c), 6 dní (d) a 6+3 dny (e).....	42
Obr. 5.5: Grafické znázornění únavového chování oceli S 960 Basquinovým modelem, modelem Kohouta a Věcheta a Weibullovým modelem. Graf referenční oceli (a), koroze v exteriéru (b), 3 dny (c), 6 dní (d) a 6+3 dny (e).....	44
Obr. 5.6: Souhrnný graf únavového chování oceli S 460, obsahuje data jak oceli referenční, tak všech ocelí korodovaných.....	46
Obr. 5.7: Graf znázorňující pokles maximálního napětí oceli S 460 v závislosti na stupni degradace.....	46
Obr. 5.8: Graf procentuálního poklesu únosnosti oceli S 460 v závislosti na stupni degradace.....	46
Obr. 5.9: Souhrnný graf únavového chování oceli S 690, obsahuje data jak oceli referenční, tak všech ocelí korodovaných.....	47
Obr. 5.10: Graf znázorňující pokles maximálního napětí oceli S 690 v závislosti na stupni degradace.....	48
Obr. 5.11: Graf procentuálního poklesu únosnosti oceli S 690 v závislosti na stupni degradace.....	48

Obr. 5.12: Souhrnný graf únavového chování oceli S 960, obsahuje data jak oceli referenční, tak všech ocelí korodovaných. ....	49
Obr. 5.13: Graf znázorňující pokles maximálního napětí oceli S 960 v závislosti na stupni degradace	50
Obr. 5.14: Graf procentuálního poklesu únosnosti oceli S 960 v závislosti na stupni degradace .....	50
Obr. 6.1: Stádia únavového procesu [14].....	51
Obr. 6.2: Schéma hysterezní smyčky [13].....	52
Obr. 6.3: Definice cyklického zpevnění a změkčení pro různé režimy zatěžování [13] .....	52
Obr. 6.4: Hysterezní smyčky pro měkké a tvrdé zatěžování [13].....	53
Obr. 6.5: Cyklická deformační křivka (vlevo) a porovnání cyklické deformační křivky s tahovým diagramem (vpravo) [28] .....	54
Obr. 6.6: Etapy šíření trhliny [26].....	56
Obr. 6.7: Schéma Lairdova mechanismu šíření trhliny [13] .....	56
Obr. 6.8: Schéma únavového lomu [27].....	57
Obr. 7.1: Fotografie digitálního mikroskopu Olympus DXS 1000.....	58
Obr. 7.2: Graf závislosti celkové plochy lomu oceli S 460 na maximálním napětí porušených vzorků.	59
Obr. 7.3: Graf závislosti plochy pásma urychleného rozvoje oceli S 460 na maximálním napětí porušených vzorků. ....	59
Obr. 7.4: Graf závislosti plochy pásma dolomení oceli S 460 na maximálním napětí porušených vzorků. ....	60
Obr. 7.5: Graf únavových modelů oceli S 460 se zvýrazněnými vzorky vyskytující se v pozorovaných oblastech .....	60
Obr. 7.6: Fotografie lomové plochy oceli S 460 referenční, vzorek č. 7.....	61
Obr. 7.7: Fotografie lomové plochy oceli S 460 referenční, vzorek č. 16 .....	61
Obr. 7.8: Fotografie lomové plochy oceli S 460 referenční, vzorek č. 14 .....	61
Obr. 7.9: Fotografie lomové plochy oceli S 460 koroze v exteriéru, vzorek č. 2 .....	62
Obr. 7.10: Fotografie lomové plochy oceli S 460 koroze v exteriéru, vzorek č. 3 .....	62
Obr. 7.11: Fotografie lomové plochy oceli S 460 korodované 3 dny, vzorek č. 2 .....	62
Obr. 7.12: Fotografie lomové plochy oceli S 460 korodované 3 dny, vzorek č. 4 .....	62
Obr. 7.13: Fotografie lomové plochy oceli S 460 korodované 6 dní, vzorek č. 3.....	63
Obr. 7.14: Fotografie lomové plochy oceli S 460 korodované 6 dní, vzorek č. 5.....	63
Obr. 7.15: Fotografie lomové plochy oceli S 460 korodované 6 dní, vzorek č. 6.....	63
Obr. 7.16: Fotografie lomové plochy oceli S 460 korodované 9 dní, vzorek č. 3.....	63
Obr. 7.17: Fotografie lomové plochy oceli S 460 korodované 9 dní, vzorek č. 5.....	63
Obr. 7.18: Fotografie lomové plochy oceli S 460 korodované 9 dní, vzorek č. 6.....	63
Obr. 7.19: Graf celkových lomových ploch vzorků pozorovaných oblastí oceli S 460 .....	64
Obr. 7.20: Graf plochy pásma urychleného rozvoje lomu vzorků pozorovaných oblastí oceli S 460 ...	64
Obr. 7.21: Graf plochy pásma dolomení vzorků pozorovaných oblastí oceli S 460.....	64
Obr. 7.22: <i>Graf délky největší trhliny vzorků pozorovaných oblastí oceli S 460 .....</i>	<i>64</i>
Obr. 7.23: Graf závislosti celkové plochy lomu oceli S 690 na maximálním napětí porušených vzorků. ....	65
Obr. 7.24: Graf závislosti plochy pásma urychleného rozvoje oceli S 690 na maximálním napětí porušených vzorků. ....	66
Obr. 7.25: Graf závislosti plochy pásma dolomení oceli S 690 na maximálním napětí porušených vzorků. ....	66
Obr. 7.26: Graf únavových modelů oceli S 690 se zvýrazněnými vzorky vyskytující se v pozorovaných oblastech .....	67
Obr. 7.27: Fotografie lomové plochy oceli S 690 referenční, vzorek č. 15 .....	68
Obr. 7.28: Fotografie lomové plochy oceli S 690 referenční, vzorek č. 16 .....	68
Obr. 7.29: Fotografie lomové plochy oceli S 690 referenční, vzorek č. 5 .....	68
Obr. 7.30: Fotografie lomové plochy oceli S 690 koroze v exteriéru, vzorek č. 1 .....	68
Obr. 7.31: Fotografie lomové plochy oceli S 690 koroze v exteriéru, vzorek č. 2 .....	68
Obr. 7.32: Fotografie lomové plochy oceli S 690 koroze v exteriéru, vzorek č. 7 .....	68
Obr. 7.33: Fotografie lomové plochy oceli S 690 korodované 3 dny, vzorek č. 1 .....	69
Obr. 7.34: Fotografie lomové plochy oceli S 690 korodované 3 dny, vzorek č. 6 .....	69
Obr. 7.35: Fotografie lomové plochy oceli S 690 korodované 6 dní, vzorek č. 10.....	69
Obr. 7.36: Fotografie lomové plochy oceli S 690 korodované 6 dní, vzorek č. 2.....	69

Obr. 7.37: Fotografie lomové plochy oceli S 690 korodované 6 dní, vzorek č. 5 .....	69
Obr. 7.38: Fotografie lomové plochy oceli S 690 korodované 9 dní, vzorek č. 10 .....	70
Obr. 7.39: Fotografie lomové plochy oceli S 690 korodované 9 dní, vzorek č. 5 .....	70
Obr. 7.40: Graf celkových lomových ploch vzorků pozorovaných oblastí oceli S 690 .....	70
Obr. 7.41: Graf plochy pásma urychleného rozvoje lomu vzorků pozorovaných oblastí oceli S 690 ...	70
Obr. 7.42: Graf plochy pásma dolomení vzorků pozorovaných oblastí oceli S 690 .....	70
<i>Obr. 7.43: Graf délky největší trhliny vzorků pozorovaných oblastí oceli S 690 .....</i>	<i>70</i>
Obr. 7.44: Graf závislosti celkové plochy lomu oceli S 960 na maximálním napětí porušených vzorků. .....	71
Obr. 7.45: Graf závislosti plochy pásma urychleného rozvoje oceli S 960 na maximálním napětí porušených vzorků. ....	71
Obr. 7.46: Graf závislosti plochy pásma dolomení oceli S 960 na maximálním napětí porušených vzorků. ....	72
Obr. 7.47: Graf únavových modelů oceli S 960 se zvýrazněnými vzorky vyskytující se v pozorovaných oblastech .....	72
Obr. 7.48: Fotografie lomové plochy oceli S 960 referenční, vzorek č. 3 .....	73
Obr. 7.49: Fotografie lomové plochy oceli S 960 referenční, vzorek č. 20 .....	73
Obr. 7.50: Fotografie lomové plochy oceli S 960 referenční, vzorek č. 17 .....	73
Obr. 7.51: Fotografie lomové plochy oceli S 960 koroze v exteriéru, vzorek č. 10 .....	74
Obr. 7.52: Fotografie lomové plochy oceli S 960 koroze v exteriéru, vzorek č. 4 .....	74
Obr. 7.53: Fotografie lomové plochy oceli S 960 koroze v exteriéru, vzorek č. 7 .....	74
Obr. 7.54: Fotografie lomové plochy oceli S 960 korodované 3 dny, vzorek č. 1 .....	74
Obr. 7.55: Fotografie lomové plochy oceli S 960 korodované 3 dny, vzorek č. 2 .....	74
Obr. 7.56: Fotografie lomové plochy oceli S 960 korodované 6 dní, vzorek č. 10 .....	75
Obr. 7.57: Fotografie lomové plochy oceli S 960 korodované 6 dní, vzorek č. 5 .....	75
Obr. 7.58: Fotografie lomové plochy oceli S 960 korodované 6 dní, vzorek č. 8 .....	75
Obr. 7.59: Fotografie lomové plochy oceli S 960 korodované 9 dní, vzorek č. 10 .....	75
Obr. 7.60: Fotografie lomové plochy oceli S 960 korodované 9 dní, vzorek č. 5 .....	75
Obr. 7.61: Graf celkových lomových ploch vzorků pozorovaných oblastí oceli S 960 .....	76
Obr. 7.62: Graf plochy pásma urychleného rozvoje lomu vzorků pozorovaných oblastí oceli S 960 ...	76
Obr. 7.63: Graf plochy pásma dolomení vzorků pozorovaných oblastí oceli S 960 .....	76
<i>Obr. 7.64: Graf délky největší trhliny vzorků pozorovaných oblastí oceli S 960 .....</i>	<i>76</i>
Obr. 8.1: Schéma analyzovaného obdélníkového vzorku s korozní prohlubní vystavenou cyklickému namáhání v tahu [29] .....	77
Obr. 8.2: Vybrané výsledky rozložení napětí podél dráhy překrývající šířku vzorku před korozní prohlubní pro různé hloubky korozní prohlubně (D mezi 0,1 a 1,0 mm) [29] .....	77

## Seznam tabulek

Tab. 1.1: Chemické složení oceli S 460 dle výrobce .....	16
Tab. 1.2: Zprůměrované hodnoty materiálových vlastností oceli S 460 .....	16
Tab. 1.3: Chemické složení oceli S 690 dle výrobce .....	17
Tab. 1.4: Zprůměrované hodnoty materiálových vlastností oceli S 690 .....	17
Tab. 1.5: Chemické složení oceli S 960 dle výrobce .....	18
Tab. 1.6: Zprůměrované hodnoty materiálových vlastností oceli S 960 .....	18
Tab. 3.1: Průměrné hodnoty z tahových zkoušek korodovaných vzorků oceli S 460 .....	24
Tab. 3.2: Průměrné hodnoty z tahových zkoušek korodovaných vzorků oceli S 690 .....	25
Tab. 3.3: Průměrné hodnoty z tahových zkoušek korodovaných vzorků oceli S 960 .....	25
Tab. 4.1: Tabulka typického rozsahu počtu N, pro jednotlivé oblasti [15] .....	30
Tab. 5.1: Parametry pro Basquinův model vzorků oceli S 460 .....	39
Tab. 5.2: Parametry pro Weibullův model vzorků oceli S 460 .....	39
Tab. 5.3: Parametry pro Kohoutův a Věchetův model vzorků oceli S 460 .....	39
Tab. 5.4: Parametry pro Basquinův model vzorků oceli S 690 .....	41
Tab. 5.5: Parametry pro Weibullův model vzorků oceli S 690 .....	41
Tab. 5.6: Parametry pro Kohoutův a Věchetův model vzorků oceli S 690 .....	41
Tab. 5.7: Parametry pro Basquinův model vzorků oceli S 960 .....	43
Tab. 5.8: Parametry pro Weibullův model vzorků oceli S 960 .....	43
Tab. 5.9: Parametry pro Kohoutův a Věchetův model vzorků oceli S 960 .....	43
Tab. 5.10: Tabulka ztrát únosnosti oceli S 460, podle modelu Castilla–Canteliho, v předem určených oblastech počtu cyklů .....	46
Tab. 5.11: Tabulka ztrát únosnosti oceli S 690, podle modelu Castilla–Canteliho, v předem určených oblastech počtu cyklů .....	48
Tab. 5.12: Tabulka ztrát únosnosti oceli S 960, podle modelu Castilla–Canteliho, v předem určených oblastech počtu cyklů .....	50
Tab. 8.1: Hodnoty maximálního a průměrného von Misesova napětí spolu s odpovídajícím faktorem koncentrace napětí a jeho procentuálním rozdílem pro zvětšující se hloubku korozní prohlubně ( $D = 0,1$ až $1,0$ mm). [29].....	78

## Seznam symbolů a zkratk

### Symbole – písmena latinské abecedy

$a$	koeficient únavové pevnosti při jednom cyklu
$A$	symbol značí v práci více parametrů, pro každý případ je symbol popsán u příslušného použití
$A_{\text{celk}}$	celá plocha lomu vzorku
$A_{\text{dol}}$	plocha pásma dolomení
$A_e$	prodloužení v procentech měřené průtahoměrem na výrazné mezi kluzu
$A_g$	plastické prodloužení v procentech měřené průtahoměrem při maximálním zatížení
$A_{gt}$	celkové prodloužení v procentech měřené průtahoměrem při maximálním zatížení
$A_{\text{roz}}$	plocha pásma urychleného rozvoje lomu
$A_t$	celková tažnost
$b$	exponent únavové pevnosti
$B$	symbol značí v práci více parametrů, pro každý případ je symbol popsán u příslušného použití
$C$	místo změny křivosti křivky Kohouta a Věcheta
$C_e$	uhlíkový ekvivalent
$D$	inflexní bod křivky Kohouta a Věcheta
$d_0$	počáteční průměr zkušební tyče
$D_n$	průměr bodu nebo důlku při korozi
$D_{\text{per}}$	pokles únosnosti v procentech
$f$	frekvence
$F_m$	maximální zatížení při tahové zkoušce
$K'$	modul cyklického zpevnění
$K_t$	faktor koncentrace napětí
$L_e$	měřená délka průtahoměru
$L_{\text{max}}$	maximální délka trhlin
$L_o$	původní měřená délka
$L_u$	konečná měřená délka
$m_E$	směrnice pružní části závislosti napětí – prodloužení
$n'$	exponent cyklického zpevnění
$N$	počet cyklů
$N_c$	smluvní počet cyklů meze únavy



$N_f$	počet cyklů do lomu (z anglického <i>f</i> – fracture)
$N_0$	počet cyklů na začátku zatěžování
$N_s$	počet měření
$p$	pravděpodobnost
$P$	parametr asymetrie cyklu, nebo-li amplitudový součinitel
$P_n$	hloubka průniku korozního napadení
$q$	klesající funkce celkové životnosti
$R$	symbol značí v práci více parametrů, pro každý případ je symbol popsán u příslušného použití
$R^2$	koeficient determinace
$R_{eH}$	horní mez kluzu
$R_{eL}$	dolní mez kluzu
$R_m$	mez pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu
$s$	výběrová směrodatná odchylka
$S_o$	počáteční průřez zkušební tyče
$S_u$	konečný minimální průřez zkušební tyče
$T$	doba jednoho cyklu
$v_x$	variační koeficient
$\bar{x}$	aritmetický průměr
$x_i$	naměřené hodnoty

## **Symbols – písmena řecké abecedy**

$\beta$	symbol značí v práci více parametrů, pro každý případ je symbol popsán u příslušného použití
$\Upsilon$	zjednodušující zápis poměru v modelu Kohout a Věchet
$\delta$	parametr měřítka modelu Castillo–Canteli
$\Delta l$	přírůstek délky
$\Delta L_f$	prodloužení měřené průtahoměrem v okamžiku lomu
$\Delta L_m$	prodloužení měřené průtahoměrem při maximálním zatížení
$\Delta\sigma$	rozkmit napětí
$\varepsilon_{ae}$	amplituda elastické deformace
$\varepsilon_{ap}$	amplituda plastické deformace
$\varepsilon_{at}$	amplituda celkové deformace
$\lambda$	parametr polohy modelu Castillo–Canteli
$\sigma_a$	amplituda napětí
$\sigma_{avg}$	průměrnou hodnotu napětí
$\sigma_c$	mez únavy pro předem definovaný počet cyklů
$\sigma_d$	dolní hranice napětí
$\sigma_D$	amplituda napětí inflexního bodu
$\sigma_h$	horní hranice napětí
$\sigma_m$	střední napětí
$\sigma_{max}$	maximální napětí
$\sigma_{max,i}$	maximální napětí pozorované oceli
$\sigma_{max,ref}$	maximální napětí referenční oceli
$\sigma_{\infty}$	trvalá mez únavy
$\psi$	parametr únavového poškození
$\psi_o$	limit únavy

## Zkratky

CDF	kumulativní distribuční funkce ( <b>C</b> umulative <b>D</b> istribution <b>F</b> unction)
Hx	vysokocyklová oblast modelů podle Kohouta a Věcheta
K–V	model Kohouta a Věcheta
Lx	nízkocyklová oblast modelů podle Kohouta a Věcheta
PDF	funkce hustoty pravděpodobnostiprobability ( <b>P</b> robability <b>D</b> ensity <b>F</b> unction)
S 460	ocel ( <b>S</b> teel) s mezí kluzu min. 460 MPa
S 690	ocel ( <b>S</b> teel) s mezí kluzu min. 690 MPa
S 960	ocel ( <b>S</b> teel) s mezí kluzu min. 960 MPa
Wx	celá oblast životnosti modelů podle Kohouta a Věcheta

## **Seznam příloh**

Příloha 1: Výstupní data z tahových zkoušek

Příloha 2: Data z únavových zkoušek ocelí

Příloha 3: Hodnoty pásem lomových ploch s informacemi o zatěžování

Příloha 4: Fotografie lomových ploch a jejich detaily

# Curriculum vitae

Bc. Anna Benešová

## Osobní a kontaktní údaje:

---

Datum a místo narození: 19.3.1999, Brno, Česká republika  
Bydliště: Sv. Čecha 97, Brno, 612 00  
E-mail: [ancebeni@email.cz](mailto:ancebeni@email.cz); [Anna.Benesova1@vutbr.cz](mailto:Anna.Benesova1@vutbr.cz)  
Telefon: (+420) 737 738 205

## Vzdělání:

---

od září 2022 Magisterské studium, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, obor Konstrukce a dopravní stavby  
Veveří 331/95, 602 00 Brno

červen 2022 Bakalářský titul, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, obor Konstrukce a dopravní stavby  
Veveří 331/95, 602 00 Brno

červen 2018 Maturita, Střední průmyslová škola Stavební v Brně, obor Pozemní stavitelství  
Kudelova 1855/8, 662 51 Brno

## Pracovní zkušenosti:

---

od června 2020 Student – Diplomant, **Ústav fyziky materiálů**, Akademie věd České republiky, (ÚFM AVČR, v. v. i.), Žižkova 513/22, Brno

od března 2019 Požární preventivní hlídka, **Národní divadlo Brno**, sídlo Dvořákova 11, Brno

od září 2019 do červen 2020 a od září 2022 do červen 2023 Studentská pedagogicko–vědecká síla, **Vysoké učení technické v Brně**, Fakulta stavební, Ústav STM Veveří 331/95, Brno

## Uznání vědeckou komunitou

---

červen 2022 Cena Děkana za bakalářskou práci na téma:  
„Pokročilé vyhodnocení únavové odolnosti u vybraných stavebních materiálů“

## Další relevantní informace:

---

Jazykové znalosti:

Anglický jazyk: Úroveň B1

Softwarové znalosti: Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint), AutoCAD, ArchiCAD, Civil 3D, RFEM, MATLAB, ANSYS

## Publikační činnost:

---

### Články

[1] S. SEITL, **A. BENEŠOVÁ**, S. BLASÓN, Petr MIARKA, J. KLUSÁK a V. BÍLEK. Advanced statistical evaluation of fatigue data obtained during the measurement of concrete mixtures with various water–cement ratio: 27/28<sup>th</sup> International Conference. *ENGINEERING MECHANICS 2022*. Milovy, Czech Republic, 2022, 2022(116), 361–364. ISBN 978-80-86246-48-2. ISSN 1805-8256. Dostupné z: doi:10.21495/51-2-361

[2] S. SEITL, P. POKORNÝ, **A. BENEŠOVÁ**, T. JUHÁSZOVÁ, Z. KALA. Variance of Selected Properties from Various Structural Elements Made from AISI 304. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada stavební*. 2022, 22(2), 39-44. ISSN 1213-1962. Dostupné z: doi:10.35181/tces-2022-0013

[3] S. SEITL, **A. BENEŠOVÁ**, Á. P. PASCUAL, L. MALÍKOVÁ, D. BUJDOŠ a V. BÍLEK. Fatigue and fracture properties of concrete mixtures with various water to cement ratio and maximum size of aggregates. In: *Procedia Structural Integrity*. 2022, s. 1512-1519. Vol. 42. ISSN 2452-3216. Dostupné z: doi:org/10.1016/j.prostr.2022.12.192.

[4] **A. BENEŠOVÁ**, S. SEITL, H. ŠIMONOVÁ, P. ROVNANÍKOVÁ, Z. KERŠNER. Fatigue properties of a selected alkali-activated aluminosilicate composite: 29<sup>th</sup> International Conference. *ENGINEERING MECHANICS 2023*. Milovy, Czech Republic, 2023, 43–46. ISBN 978-80-87012-84-0. ISSN 1805-8256.

[5] L. MALÍKOVÁ, **A. BENEŠOVÁ**, M. AL KHAZALI, V. KŘIVÝ a S. SEITL. Stress concentration on a corrosion pit. *Section building structures & structural mechanics*. 2 December 2023 n. l., (Vol. 23) DOI: (in press)

[6] L. MALÍKOVÁ, **A. BENEŠOVÁ**, M. AL KHAZALI a S. SEITL. Fatigue behavior of high strength steels under various levels of corrosion. *Procedia Structural Integrity*. DOI: (in press)

### Abstrakty

[10] **A. BENEŠOVÁ**, L. MALÍKOVÁ, M. AL KHAZALI, V. KŘIVÝ, M. VACEK, S. SEITL, Analysis of the fatigue behavior of S460 damaged by various levels of corrosion

### Členka řešitelského týmu následujících projektů

---

Název projektu: Vliv samovyhojovacích účinků na prodloužení životnosti konstrukcí vyrobených z vysokohodnotného betonu – 21-08772S: 2022, 2023

Název projektu: Vliv materiálových vlastností vysokopevnostních ocelí na trvanlivost inženýrských staveb a mostů – 21-14886S: 2023

Název projektu: Analýza únavového chování vysokopevnostních ocelí poškozených různým stupněm koroze – FAST-S-23-821: 2023