

## Vliv vodíku na kinetiku růstu únavových trhlin v trubních ocelích L360NB, P355 a 42CrMo4

## The Influence of Hydrogen on the Kinetics of Fatigue Crack Growth in L360NB, P355, and 42CrMo4 Pipe Steels

Autoři: Ing. Lubomír Gajdoš, CSc<sup>1</sup>, Ing. Martin Šperl, Ph.D<sup>1</sup>, Ing. Jan Kec, Ph.D.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ústav teoretické a aplikované mechaniky AVČR, <sup>2</sup> SVÚM, a.s.

### Souhrn:

Výsledky zkoušek kinetiky růstu únavových trhlin jednoznačně poukazují na nepříznivý vliv vodíku na rychlost růstu únavových trhlin.

V rozmezí rozkmitů faktoru intenzity napětí 20–30 MPam<sup>0,5</sup> se rychlost růstu únavové trhliny u oceli L360NB zvýšila 7,5krát, u oceli P355 5,7krát (při  $\Delta K_1=20$  MPam<sup>0,5</sup>) a 9,7krát (při  $\Delta K_2=30$  MPam<sup>0,5</sup>). U oceli 42CrMo4 bylo toto zvýšení 3,3násobné při  $\Delta K_1=20$  MPam<sup>0,5</sup> a 9,5násobné při  $\Delta K_2=30$  MPam<sup>0,5</sup>.

Snížení frekvence cyklického zatěžování z hodnoty ~ 100 Hz na 1 Hz při zkouškách na vzduchu má za následek zvýšení rychlosti růstu únavové trhliny od 1,3násobku (42CrMo4) do 1,55násobku (P355).

### Klíčová slova

vliv vodíku, rychlost růstu únavových trhlin, Parisova závislost

### Summary:

The results of fatigue crack growth kinetics tests clearly indicate the adverse effect of hydrogen on the fatigue crack growth rate.

In the range of stress intensity factor fluctuations of 20–30 MPam<sup>0,5</sup>, the fatigue crack growth rate increased 7.5 times for L360NB steel, 5.7 times for P355 steel times (at  $\Delta K_1=20$  MPam<sup>0,5</sup>) and 9.7 times (at  $\Delta K_2=30$  MPam<sup>0,5</sup>). For 42CrMo4 steel, this increase was 3.3 times at  $\Delta K_1=20$  MPam<sup>0,5</sup> and 9.5 times at  $\Delta K_2=30$  MPam<sup>0,5</sup>.

Reducing the cyclic loading frequency from ~ 100 Hz to 1 Hz in air tests results in an increase in fatigue crack growth rate from 1.3 times (42CrMo4) to 1.55 times (P355).

### Key Words

effect of hydrogen, fatigue crack growth rate, Paris dependence

## 1. Úvod

V souvislosti s intenzivní snahou o dekarbonizaci energetiky a postupným plánovaným odchodem od fosilních paliv včetně potenciálu možnosti ukládání přebytečné energie ze solárních a větrných elektráren pomocí elektrolýzy a výroby vodíku z této elektřiny nabývá vodík na významu jako perspektivní nosič energie. V Evropě, kde se plánuje postupné zavádění vodíku do stávajících plynárenských infrastruktur prostřednictvím jeho míchání se zemním plynem, vyvstává nutnost detailně porozumět dopadům tohoto média na materiály používané v plynárenských energetických systémech. Jedním z klíčových problémů je vliv vodíku na mechanické vlastnosti kovových materiálů, především ocelí, a to zejména v oblasti únavového chování. Tento příspěvek navazuje na náš předchozí článek [1], který se zabýval vyšetřováním vlivu vodíku na základní mechanické a lomové vlastnosti potrubní oceli 13 126 po dlouhodobé expozici vzorků v plynném vodíku při tlaku  $p = 3,0$  MPa.

Vodíkové prostředí může výrazně urychlovat proces degradace materiálu, snižovat jeho lomovou houževnatost a odolnost vůči opakovanému namáhání [2]. Tento jev je známý pod pojmem vodíkové křehnutí. Proto je nezbytné se věnovat výzkumu únavových vlastností ocelí vystavených vodíkové atmosféře, a to jak z hlediska únavového chování materiálu obecně, tak i z hlediska vlivu vodíku na kinetiku růstu únavových trhlin v materiálu [3]. Výzkumné činnosti v této oblasti tak představují nejen materiálově-technologickou vědeckou výzvu, ale i získání klíčových znalostí potřebných pro rozvoj vodíkového hospodářství v Evropě.

Cílem tohoto výzkumu bylo charakterizovat vliv vodíku na kinetiku růstu trhlin pomocí stanovení Parisových konstant, určených na vzorcích sycených vodíkem u vybraných trubních materiálů, a jejich porovnání s referenčními hodnotami stanovenými na vzorcích bez vodíkové expozice. Než se tím budeme zabývat, bude

užitečné podívat se nejdříve na kinetiku růstu únavových trhlin na vzduchu. Výsledky týkající se tohoto předmětu budeme považovat za základní referenční.

## 2. Referenční vzorky

Pro zkoušky kinetiky růstu únavových trhlin byly použity vzorky pro asymetrický tah, takzvané CT (compact tension), vyrobené z dodaných trubních segmentů (trubky z oceli L360NB a P355) a válcového materiálu z oceli 42CrMo4. Základní mechanické vlastnosti těchto materiálů jsou uvedeny v tabulce 1.

CT vzorky byly vyrobeny tak, že startovací vrub i z něj iniciovaná trhlina měly podélnou orientaci vzhledem k ose trubky nebo válce. Pro získání referenčních hodnot Parisových konstant byly trhliny generovány cyklickým zatěžováním podle normy [4].

Startovací vrub i následovná trhlina byly podélně orientovány vzhledem k ose trubky

U všech CT vzorků byla měřena rychlost růstu únavových trhlin během cyklování na vysokofrekvenčním rezonančním vibrátoru RUMUL MIKROTRON o silové kapacitě 20 kN v únavové laboratoři ÚTAM. Hodnoty tloušťky CT vzorků i horní úroveň zatěžovací síly při cyklování a výsledky měření délky únavových trhlin v závislosti na počtu aplikovaných cyklů  $N$  jsou uvedeny v tabulce 2 pro ocel L360NB, v tabulce 3 pro ocel P355 a v tabulce 4 pro ocel 42CrMo4. Délkové veličiny  $B$  (tloušťka),  $a$  (délka trhliny),  $a_0$  (počáteční délka trhliny),  $a_1$ ,  $a_2$  (nárůsty trhliny z obou stran vzorku) jsou v těchto tabulkách vyjádřeny v (mm) a horní úroveň zatěžovací síly  $F$  v (kN). Součinitel asymetrie cyklu při nacyklování trhlin byl  $R=0,1$ .

**Tabulka 1 – Příčné rozměry tahových tyčí a výsledky tahových zkoušek**

materiál	vzorek	šířka $w$ (mm)	tloušťka $t$ (mm)	$A_5$ (%)	$R_e$ (MPa)	$R_m$ (MPa)
P355	T1	9,39	4,96	28,1	353	514
	T2	9,84	4,94	31,7	355	523
L360NB	T1	9,85	4,91	31,5	372	522
	T2	9,82	4,92	35,7	387	529
42CrMo4	T1	10,03	4,96	14,8	496	722
	T2	9,83	4,99	15,2	504	724

Tabulka 2 - Výsledky měření růstu trhliny během cyklování CT vzorků z oceli L360NB

CT 1	B = 5,91	$a_0 = 24,26$	F = 3,2
$a_1$	$a_2$	N	a
0,2	0,1	13954	24,41
0,8	0,5	30877	24,91
1,2	0,8	40514	25,26
1,6	1,1	49011	25,61
1,9	1,5	56122	25,96
2,25	1,8	62150	26,28
2,5	2,1	66969	26,56
CT 2	B = 5,81	$a_0 = 23,93$	F = 3,3
$a_1$	$a_2$	N	a
0,4	0,3	14660	24,28
0,65	0,55	22247	24,53
1,05	0,9	28956	24,90
1,35	1,25	35163	25,23
1,70	1,6	40963	25,58
2,1	2,0	46515	25,98
2,45	2,3	51254	26,30
CT3	B = 6,03	$a_0 = 24,08$	F = 3,4
$a_1$	$a_2$	N	a
0,25	0,2	12464	24,30
0,75	0,5	24609	24,70
1,1	0,8	32440	25,03
1,5	1,2	40155	25,43
1,9	1,6	46443	25,83
2,25	2,0	52244	26,20
2,6	2,25	56477	26,50
CT4	B = 5,71	$a_0 = 24,12$	F = 3,5
$a_1$	$a_2$	N	a
0,2	0,1	7089	24,27
1,0	0,45	14171	24,84
1,1	0,9	20630	25,12
1,2	1,3	26533	25,37
1,6	1,7	31782	25,77
1,9	2,1	36167	26,12
2,3	2,45	40446	26,49
CT5	B = 5,55	$a_0 = 24,14$	F = 3,3
$a_1$	$a_2$	N	a
0,25	0,2	12001	24,36
0,7	0,5	19884	24,74
1,0	0,9	26861	25,09
1,4	1,25	32919	25,46
1,8	1,6	37969	25,84
2,15	1,95	42656	26,19
2,5	2,3	47010	26,54

**Tabulka 2 - Výsledky měření růstu trhliny během cyklování CT vzorků z oceli L360NB (pokračování)**

CT6	B = 5,86	$a_0 = 24,14$	F = 3,4
$a_1$	$a_2$	N	a
0,3	0,4	18744	24,49
0,6	0,8	28004	24,84
0,9	1,1	36002	25,14
1,2	1,4	43221	25,44
1,5	1,8	49789	25,79
1,9	2,2	56227	26,19
2,1	2,45	60356	26,41

CT7	B = 5,95	$a_0 = 24,23$	F = 3,5
$a_1$	$a_2$	N	a
0,4	0,4	18228	24,63
0,65	0,75	26376	24,93
1,0	1,1	33257	25,28
1,35	1,5	39454	25,65
1,7	1,9	45125	26,03
2,05	2,3	50423	26,40
2,35	2,4	54083	26,60

**Tabulka 3 - Výsledky měření růstu trhliny během cyklování CT vzorků z oceli P355**

CT 1	B = 6,02	$a_0 = 24,54$	F = 3,3
$a_1$	$a_2$	N	a
0,5	0,3	22943	24,94
0,8	0,5	32980	25,19
1,15	0,8	41300	25,51
1,45	1,1	48792	25,81
1,75	1,5	55908	26,16
2,1	1,85	62598	26,51
2,4	2,1	68110	26,79

CT 2	B = 6,01	$a_0 = 24,36$	F = 3,4
$a_1$	$a_2$	N	a
0,6	0,1	22951	24,71
0,8	0,35	31985	24,93
1,25	0,6	39874	25,28
1,6	0,95	47621	25,63
1,9	1,2	53608	25,91
2,2	1,55	58703	26,23
2,5	1,9	63457	26,56

Tabulka 3. - Výsledky měření růstu trhliny během cyklování CT vzorků z oceli P355 (pokračování)

CT3	B = 5,83	$a_0 = 24,38$	F = 3,5
$a_1$	$a_2$	N	a
0,2	0,3	11851	24,63
0,5	0,6	19312	24,93
0,85	0,95	25700	25,28
1,2	1,3	31438	25,63
1,6	1,7	37015	26,03
1,9	2,05	41932	26,35
2,3	2,4	46260	26,73

CT4	B = 6,06	$a_0 = 24,25$	F = 3,5
$a_1$	$a_2$	N	a
0,3	0,3	15174	24,55
0,9	0,6	22892	25,0
1,25	0,85	29534	25,3
1,55	1,2	35392	25,62
2,0	1,5	41260	26,0
2,3	1,85	46499	26,32
2,65	2,1	51416	26,62

CT5	B = 5,78	$a_0 = 24,35$	F = 3,2
$a_1$	$a_2$	N	a
0,3	0,3	14790	24,65
0,6	0,6	23877	24,95
0,9	0,95	31717	25,27
1,25	1,3	38946	25,62
1,55	1,6	45602	25,92
1,85	1,9	51219	26,22
2,15	2,3	56430	26,57

CT6	B = 5,85	$a_0 = 24,34$	F = 3,3
$a_1$	$a_2$	N	a
0,2	0,35	14162	24,61
0,5	0,7	22678	24,94
0,8	1,1	30120	25,29
1,1	1,4	36824	25,59
1,5	1,8	43277	25,99
1,8	2,1	48796	26,29
2,1	2,45	53666	26,61

CT7	B = 6,05	$a_0 = 24,31$	F = 3,4
$a_1$	$a_2$	N	a
0,3	0,25	16923	24,59
0,6	0,8	25564	25,01
1,0	1,15	33365	25,39
1,3	1,5	40383	25,71
1,7	1,75	47090	26,04
2,0	2,25	52448	26,44
2,2	2,5	55707	26,66

Tabulka 4 - Výsledky měření růstu trhliny během cyklování CT vzorků z oceli 42CrMo4

CT 1	B = 5,93	$a_0 = 24,12$	F = 3,3
$a_1$	$a_2$	N	a
0,7	1,2	83665	25,07
0,9	1,35	92375	25,24
1,2	1,6	100260	25,52
1,6	2,0	108838	25,92
1,9	2,5	115778	26,32
2,1	2,5	118995	26,42

CT 2	B = 5,92	$a_0 = 23,98$	F = 3,4
$a_1$	$a_2$	N	a
0,8	0,2	33565	24,48
1,1	0,5	41208	24,78
1,4	0,8	50672	25,08
1,8	1,1	58504	25,43
2,1	1,5	66288	25,78
2,5	1,8	73337	26,13

CT3	B = 5,88	$a_0 = 24,02$	F = 3,5
$a_1$	$a_2$	N	a
0,3	0,4	26235	24,37
0,6	0,7	35730	24,67
1,0	1,0	43467	25,02
1,35	1,4	50451	25,39
1,7	1,75	56754	25,74
2,0	2,1	62829	26,07
2,4	2,45	68521	26,44

CT4	B = 5,94	$a_0 = 23,85$	F = 3,6
$a_1$	$a_2$	N	a
0,5	0,55	46914	24,37
0,9	0,8	55017	24,7
1,2	1,1	61953	25,0
1,35	1,4	68241	25,22
1,7	1,8	74002	25,6
2,15	2,1	79393	25,97
2,5	2,55	84560	26,37

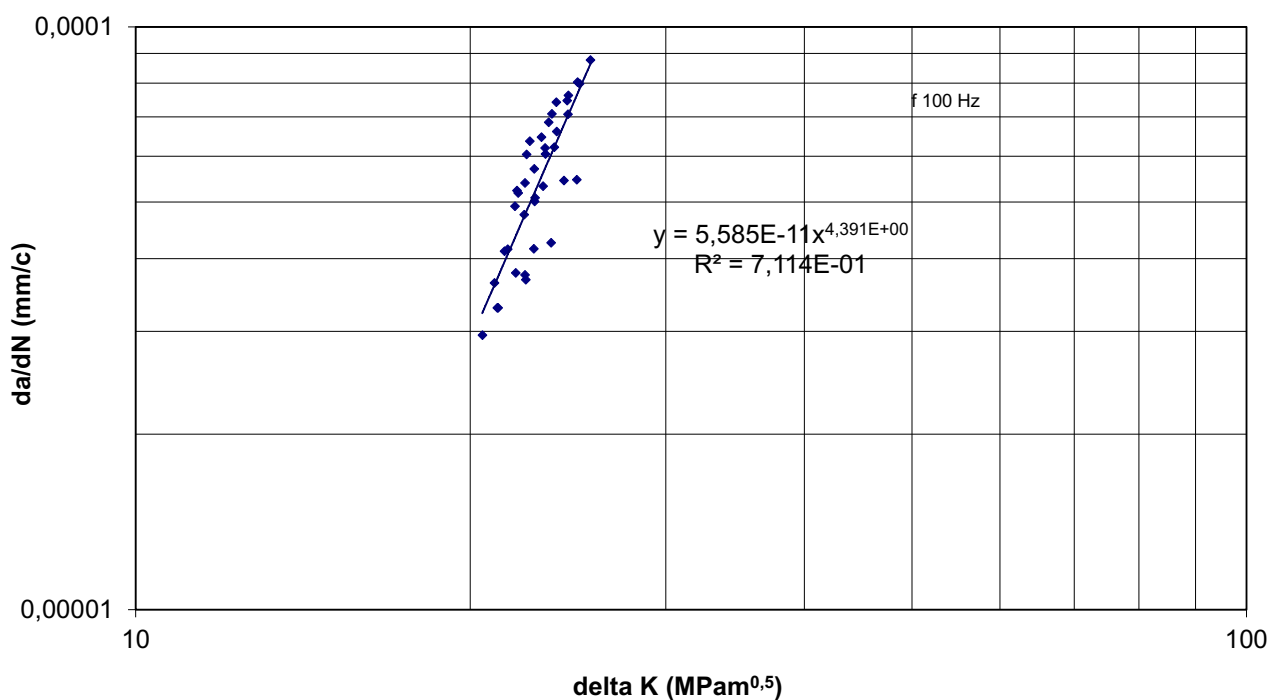
CT5	B = 5,93	$a_0 = 23,97$	F = 3,7
$a_1$	$a_2$	N	a
0,5	0,2	31301	24,32
1,0	0,4	43184	24,67
1,4	0,9	51331	25,12
1,75	1,25	58456	25,47
2,1	1,65	65038	25,84
2,5	2,0	71083	26,22

Tabulka 4 – Výsledky měření růstu trhliny během cyklování CT vzorků z oceli 42CrMo4 (pokračování)

CT6	B = 5,94	$a_0 = 24,2$	F = 3,8
$a_1$	$a_2$	N	a
0,5	0,3	22648	24,6
0,85	0,7	30234	24,97
1,2	1,1	36862	25,35
1,5	1,45	42717	25,67
1,9	1,8	48318	26,05
2,25	2,2	53610	26,42

CT7	B = 5,95	$a_0 = 23,98$	F = 3,9
$a_1$	$a_2$	N	a
1,2	1,0	31596	25,08
1,5	1,55	37315	25,5
1,85	1,7	42093	25,75
2,2	2,0	46764	26,08
2,5	2,25	50185	26,35

Parisova závislost pro ocel L360NB metodou dvojbodové sečny



Obr. 1 – Parisova závislost pro ocel L360NB

Údaje z tabulek 2–4 byly využity ke konstrukci Parisových závislostí, udávajících průběh rychlosti růstu únavových trhlin v závislosti na rozkmitu faktoru intenzity napětí  $\Delta K$ . Samotný faktor intenzity napětí  $K$  je určený vztahem (1)

$$K = Y \sigma_{nom} \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

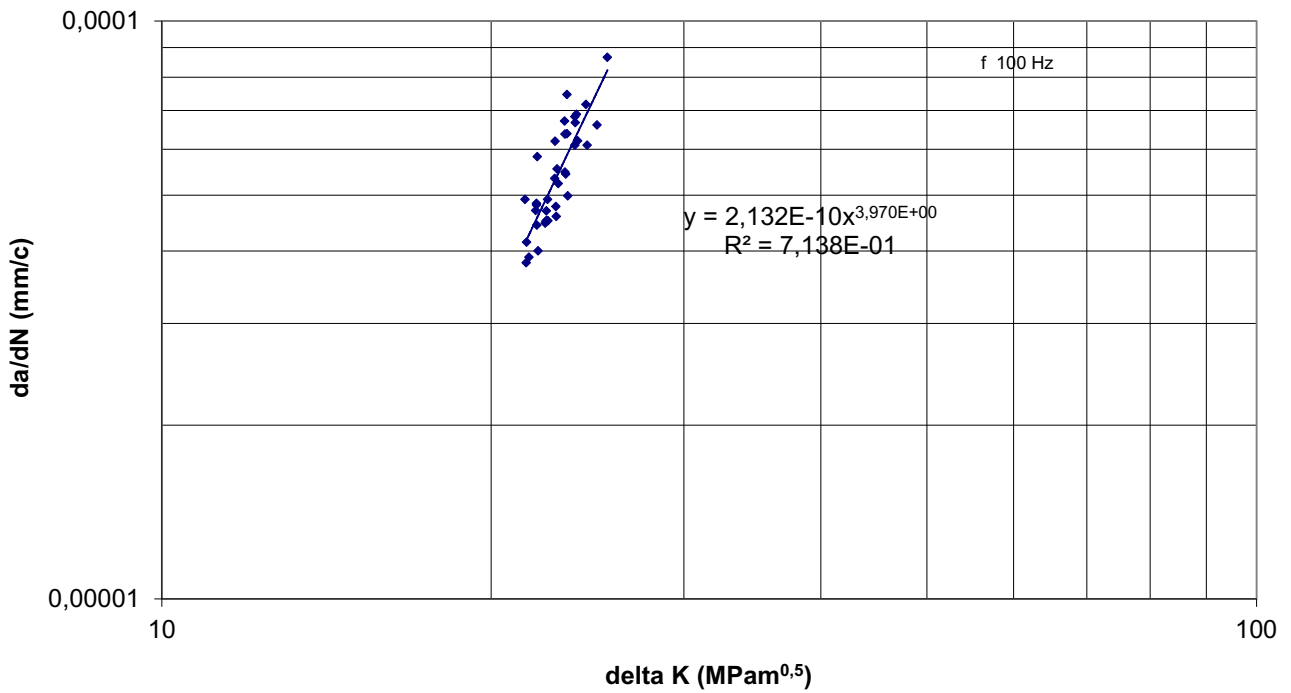
kde  $Y$  je geometrický faktor, závislý na vzájemné konfiguraci trhliny a tělesa,  
 $\sigma_{nom}$  je nominální napětí působící kolmo na rovinu trhliny  
 $a$  je rozměr trhliny

Kinetika růstu únavových trhlin se řídí takzvaným Parisovým zákonem:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K_{ef})^n \quad (2)$$

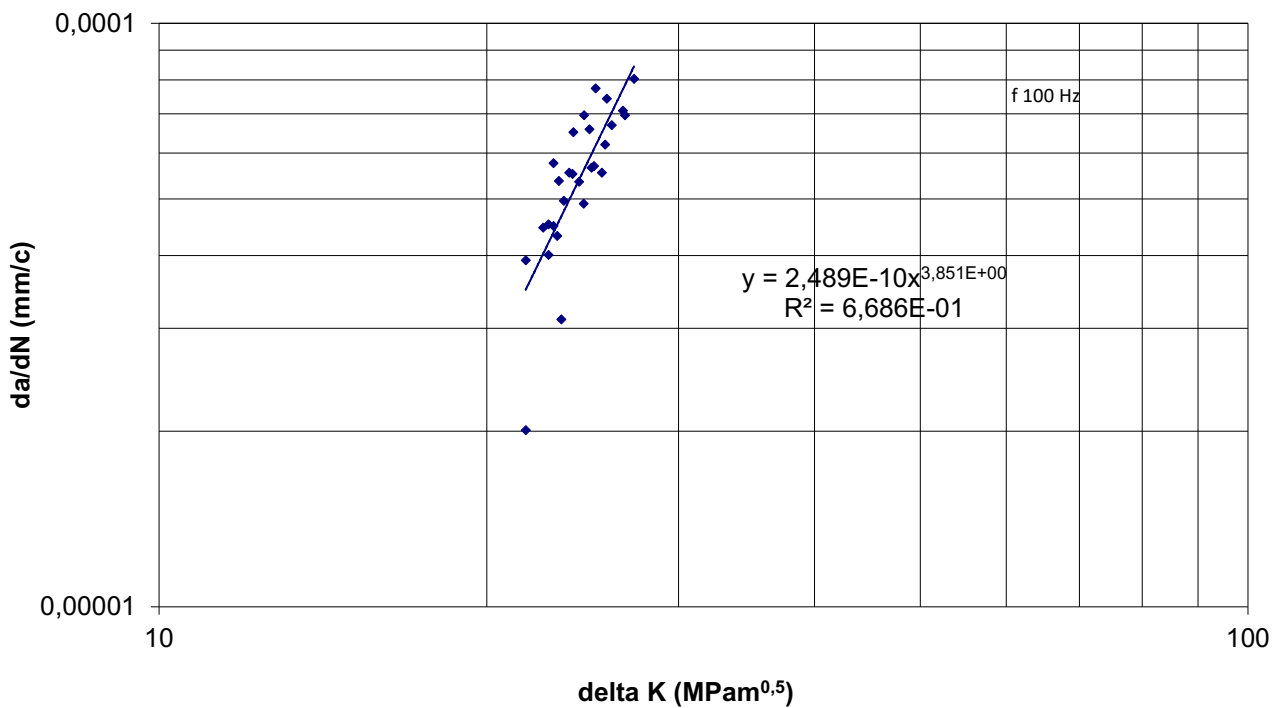
kde  $\Delta K_{ef} = \frac{\Delta K}{(1-r)^\gamma}$  je efektivní hodnota rozkmitu faktoru intenzity napětí

**Parisova závislost pro ocel P355 metodou dvojbodové sečny**

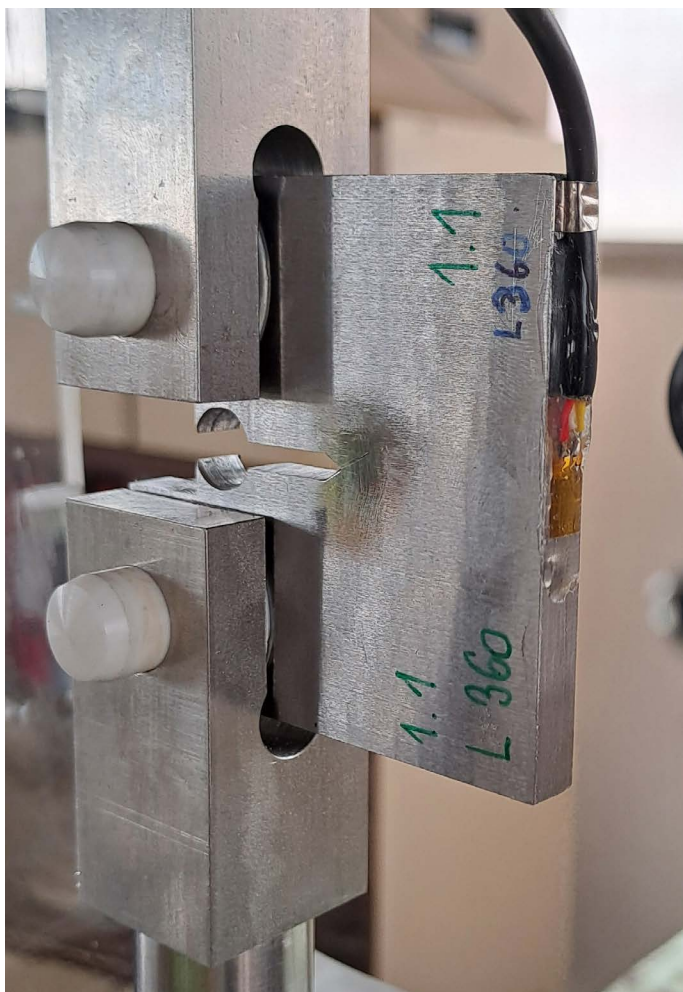


Obr. 2 – Parisova závislost pro ocel P355

**Parisova závislost pro ocel 42CrMo4 metodou dvojbodové sečny**



Obr. 3 – Parisova závislost pro ocel 42CrMo4



Obr. 4 – CT vzorek uchycený keramickými čepy do zatěžovacího rámu

Obr. 5 – Fotografie z měření referenčního vzorku, kde bylo provedeno optické měření délky trhliny pomocí Brinellovy lupy (v zadní části fotografie) a měření pomocí tenzometru, umístěného na protilehlé straně vzorku proti straně s trhlinou

**Tabulka 5 – Hodnoty Parisových konstant a čtverce spolehlivosti R<sup>2</sup>**

těleso	C	n	R <sup>2</sup>
L360NB	5,585.10 <sup>-11</sup>	4,391	0,7165
P355	2,132.10 <sup>-10</sup>	3,970	0,7107
42CrMo4	2,489.10 <sup>-10</sup>	3,851	0,6308

$$r = \frac{K_{\min}}{K_{\max}}$$

$\gamma$

je součinitel asymetrie cyklu a

je exponent, který má pro většinu ocelových materiálů hodnotu 0,7

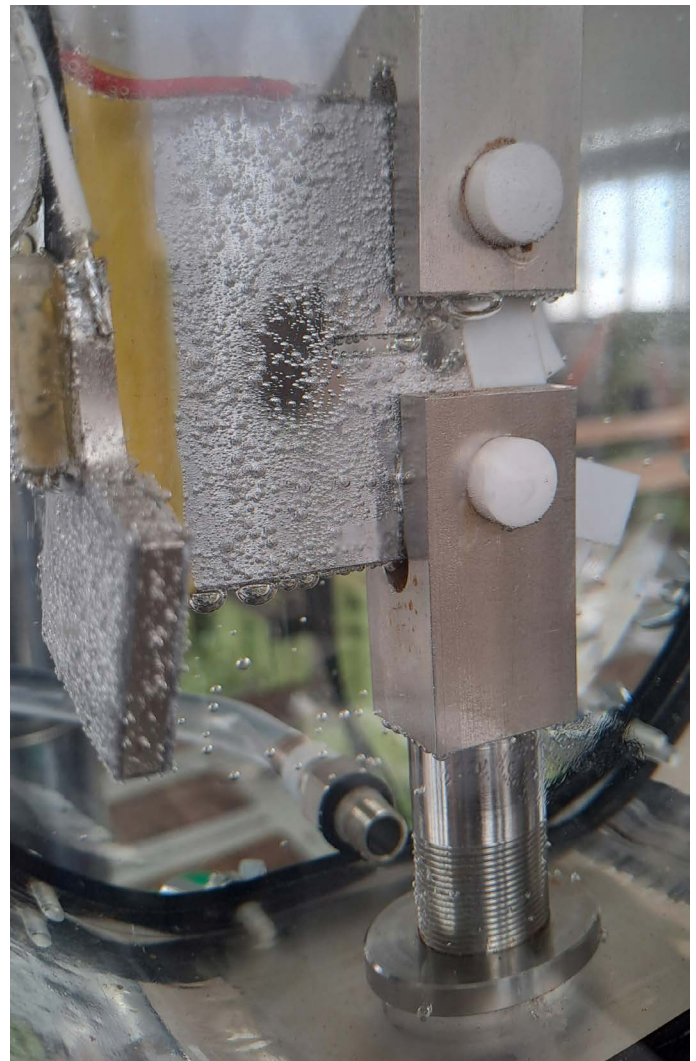
$$\frac{da(j)}{dN} = \frac{a_{j+1} - a_j}{N_{j+1} - N_j} \quad (3)$$

přičemž faktor intenzity napětí K se počítal pro velikost trhliny  $(a_{j+1} + a_j)/2$ .

Pro určení Parisovy konstanty C a Parisova exponentu

n v rovnici (2) jsme určovali průměrnou rychlost růstu únavové trhliny  $da/dN$  mezi dvěma úseky cyklického zatěžování dle metody dvojbodové sečky podle vztahu:

Dvojicemi bodů  $(K_j - da(j)/dN)$  jsme pak proložili mocninou křivku (2), čímž jsme získali hodnoty Parisovy konstanty C a exponentu n. Parisovy závislosti, určené dle těchto vztahů, jsou uvedeny na obr. 1 pro ocel L360NB, na obr. 2 pro ocel P355 a na obr. 3 pro ocel 42CrMo4.



Obr. 6 – Sestava pro elektrolytické sycení vzorku vodíkem při jeho cyklickém zatěžování

Získané výsledky ve formě Parisových konstant jsou uvedeny v tabulce 5, kde jsou uvedeny i hodnoty čtverce spolehlivosti Parisovy závislosti (2).

### 3. Měření kinetiky růstu únavových trhlin ve vodíku

Celkem bylo vyrobeno po třech vzorcích z každého materiálu, přičemž jeden vzorek byl referenční. Referenční vzorek byl zatěžován jako ostatní vzorky v pracovní komoře instalované na zatěžovacím stroji, ale bez vodíku. Smyslem bylo jednak zjistit vliv frekvence zatěžování na rychlost růstu únavové trhliny (při frekvenci  $\sim 100$  Hz a 1 Hz) a jednak určit vliv generovaného vodíku na zvýšení rychlosti růstu únavové trhliny ve srovnání s referenčním vzorkem. Zkoušky probíhaly tak, že CT vzorky s přednacyklovanou

trhlinou byly umístěny do utěsněné komory s vodíkem, který byl generován elektrolyticky (elektrolyt: vodní roztok kuchyňské soli NaCl 0,5 M) na elektrohydraulickém stroji INSTRON, model 1343, se silovou kapacitou 100 kN.

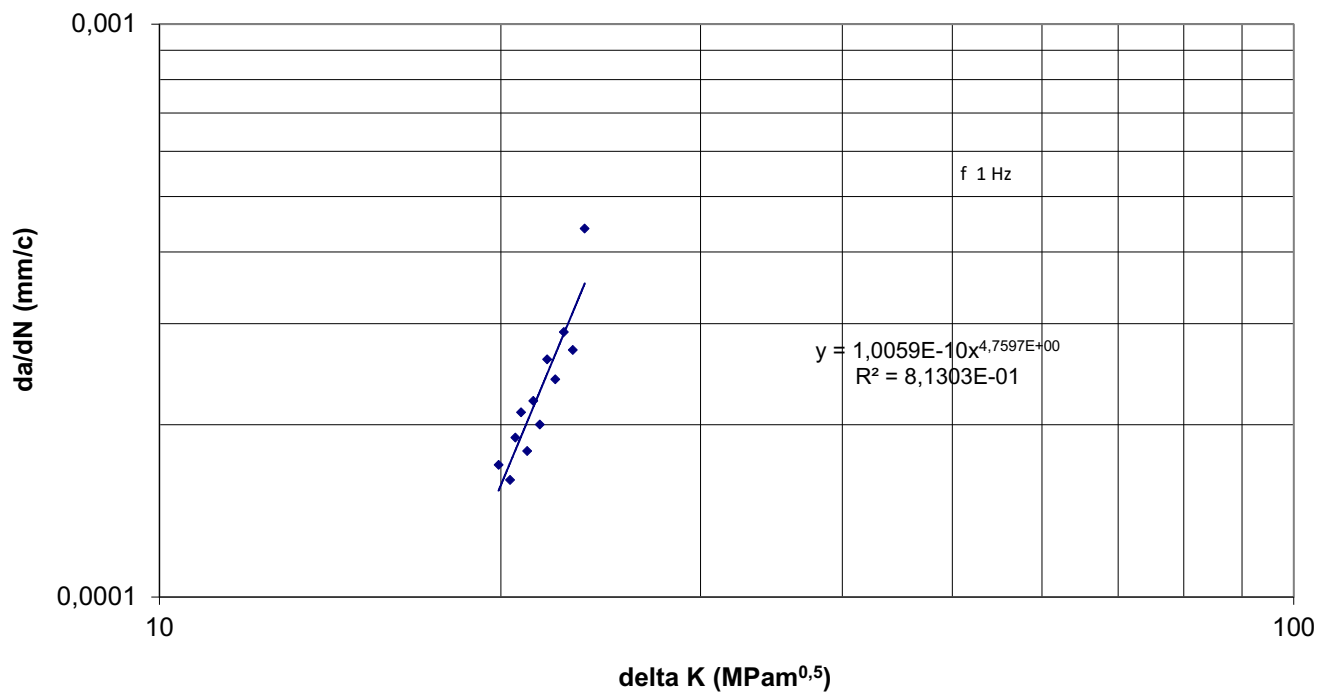
Po potřebné době sycení ( $\sim$  pět hodin) byly oba vzorky z každého materiálu cyklicky zatěžovány při frekvenci 1 Hz na dvě odlišné úrovně maximální síly v cyklu při dodržení součinitele asymetrie cyklu  $R = 0,1$ . Výjimkou byla ocel 42CrMo4, kde došlo k poškození jednoho vzorku, takže zkouška ve vodíku proběhla jenom na jednom vzorku. Na všech vzorcích byl na jejich zadní straně proti čelu trhliny nalepen lineární fóliový tenzometr (3/120 LY61, HBM, Německo), délky 3 mm o elektrickém odporu 120  $\Omega$ . Pomocí těchto tenzometrů byla při zkouškách měřena délka trhliny vždy po aplikaci určitého počtu aplikovaných cyklů. Geometrické uspořádání zkoušky včetně místa nalepení tenzometru je názorně vidět na obr. 4.

V utěsněné komoře byl vodík generován elektrolyticky (vodní roztok NaCl 0,5 M)

Jak je patrné z tohoto obrázku, na zadní straně CT vzorku (proti čelu trhliny) je nalepený tenzometr, který sloužil k nepřímému měření růstu trhliny pomocí změny deformace vzorku při postupném prodlužování trhliny vlivem cyklic-

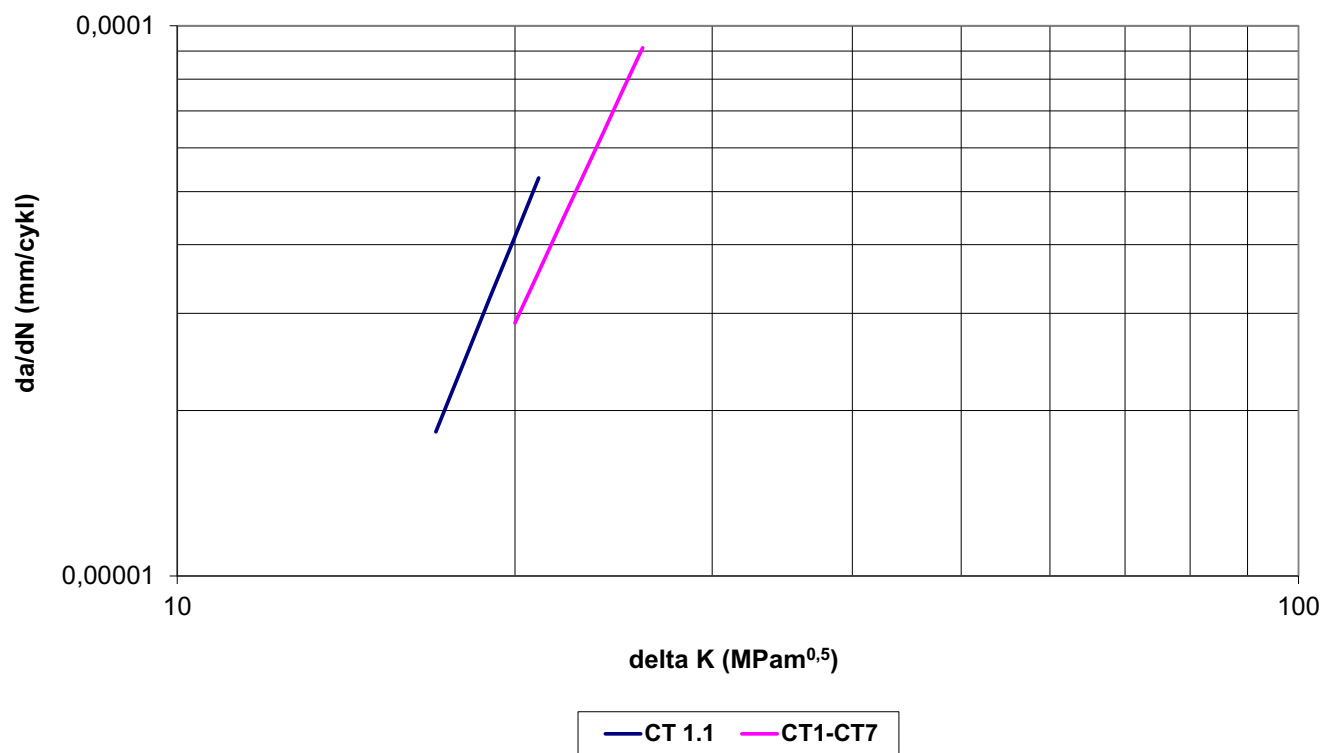


L360 1.3



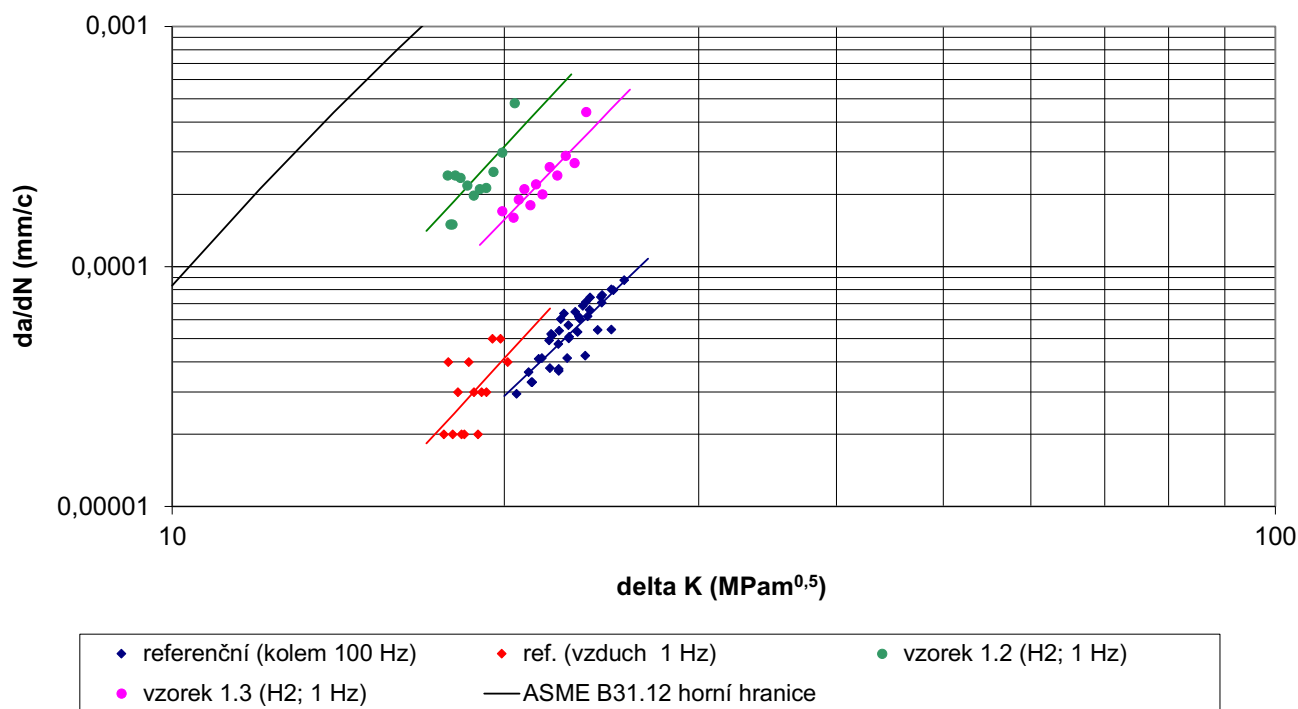
Obr. 9 – Parisova závislost pro vzorek L360 1.3

L360; referenční



Obr. 10 – Porovnání Parisovy křivky pro vzorek CT 1.1 ( $f = 1 \text{ Hz}$ ) s Parisovou křivkou získanou na sedmi CT vzorcích při frekvenci  $\sim 100 \text{ Hz}$

L360NB



Obr. 11 – Porovnání rychlosti růstu únavových trhlin ve vodíku a na vzduchu

kého zatěžování v průběhu testu. Ačkoliv lze tyto nárůsty trhliny určit výpočtem z naměřené deformace, u referenčních vzorků byla také provedena kontrolní měření v kombinaci s klasickým měřením nárůstu trhliny pomocí optických odečtů. Důvodem pro tento postup bylo získat reálná data, která zohlední i nerovnoměrnost růstu trhliny. Výpočetní model situaci oproti praxi idealizuje. Tím vznikly referenční diagramy „délka trhliny – deformace“, které sloužily pro odečty nárůstu trhlin na vzorcích exponovaných ve vodíku dle naměřené deformace tenzometrem.

Tento postup byl zvolen z toho důvodu, že nebylo možné využít klasické optické metody pro měření vzorků ve vodíku, neboť vodík byl generován pomocí elektrolýzy a pro vzorek ponořený v elektrolytu bylo optické měření povrchové délky trhliny neproveditelné. Na obr. 5 je názorně vidět uspořádání zkoušky pro stanovení referenční křivky. Tato měření byla provedena pouze na skupině referenčních vzorků a u vzorků exponovaných ve vodíku byly následovně využity experimentálně určené křivky pro stanovení velikosti trhliny z tenzometrem naměřených hodnot poměrné deformace.

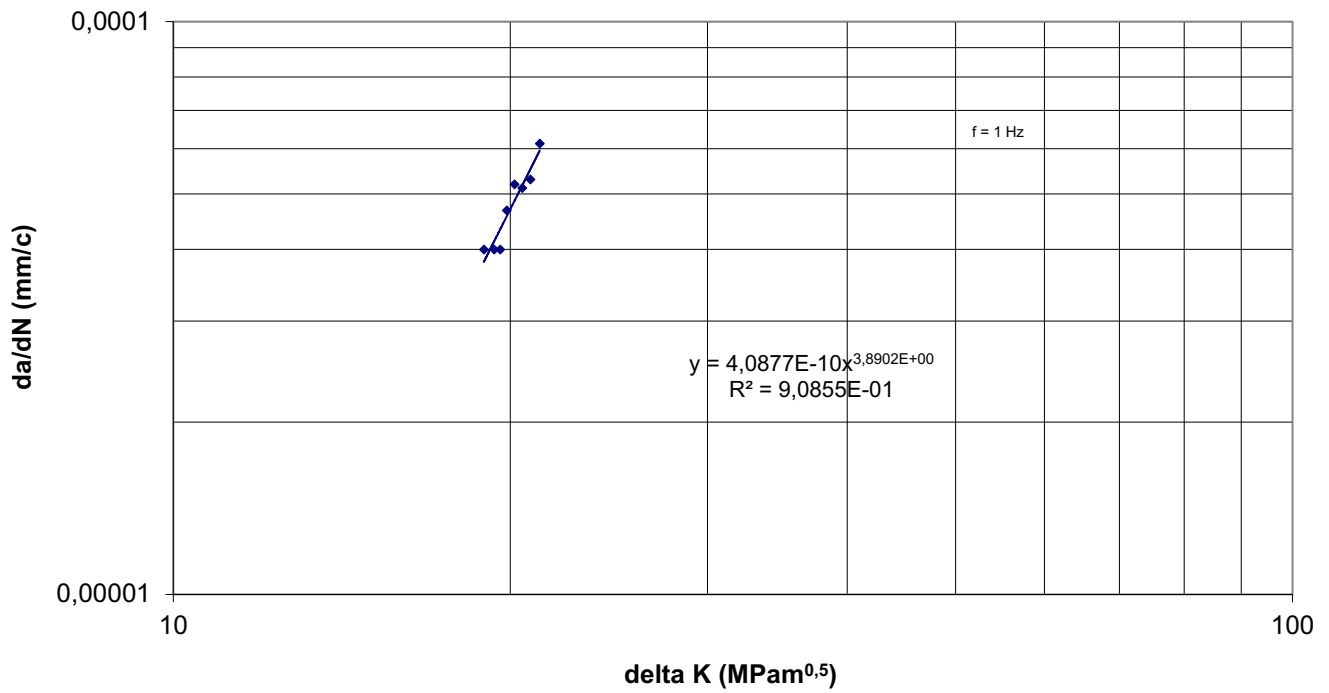
Jak již bylo uvedeno výše, vodíková expozice vzorků probíhala pomocí elektrolýzy při současném cyklickém zatěžování. K tomu bylo potřeba vyvinout speciální komoru, která byla umístěna na zatěžovacím stroji a která umožňovala aplikaci síly na vzorek a zároveň jeho ponoření v elektrolytu. Předstycení předepnutého vzorku v elektrolytu trvalo 5 hodin při proudové hustotě 10 mA/cm<sup>2</sup>. Vzorek byl napojen na – pól a tvořil anodu. Platinová elektroda byla připojena na + pól a tvořila katodu. Objem elektrolytu v expoziční komoře byl 2,7 litrů. Současně se vzorkem byla připojena do stejného obvodu jako zkoušený vzorek i kontrolní destička z totožného materiálu. Tato destička sloužila k určení množství absorbovaného vodíku při expozici. Ke stanovení objemu difuzibilního vodíku ve vzorku byla použita termální desorpční analýza na pracovišti VŠCHT v Technoparku Kralupy nad Vltavou. V tabulce 6 jsou přehledně uvedeny hodnoty absorbovaného vodíku.

Důvodem k předstycení vzorků byla snaha o co nejpřesnější simulaci stavu materiálu po jeho roční expozici v plynném vodíku při tlaku 50 barů a 50 °C za ponoru v ložis-

Tabulka 6 – Hodnoty absorbovaného vodíku v ocelích během expozice

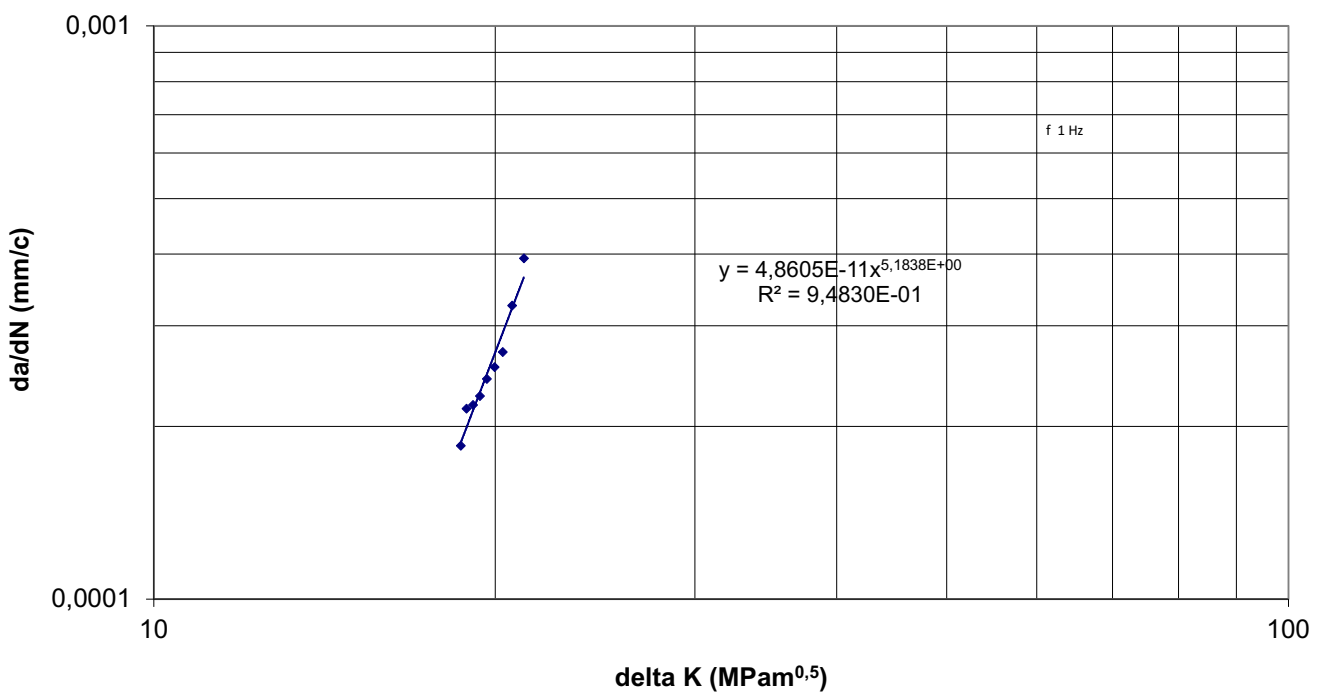
Třída oceli	Obsah vodíku [hm.ppm]
42CrMo4	0,17
L360NB	0,03
P355	0,05

**P355 2.1 (referenční)**



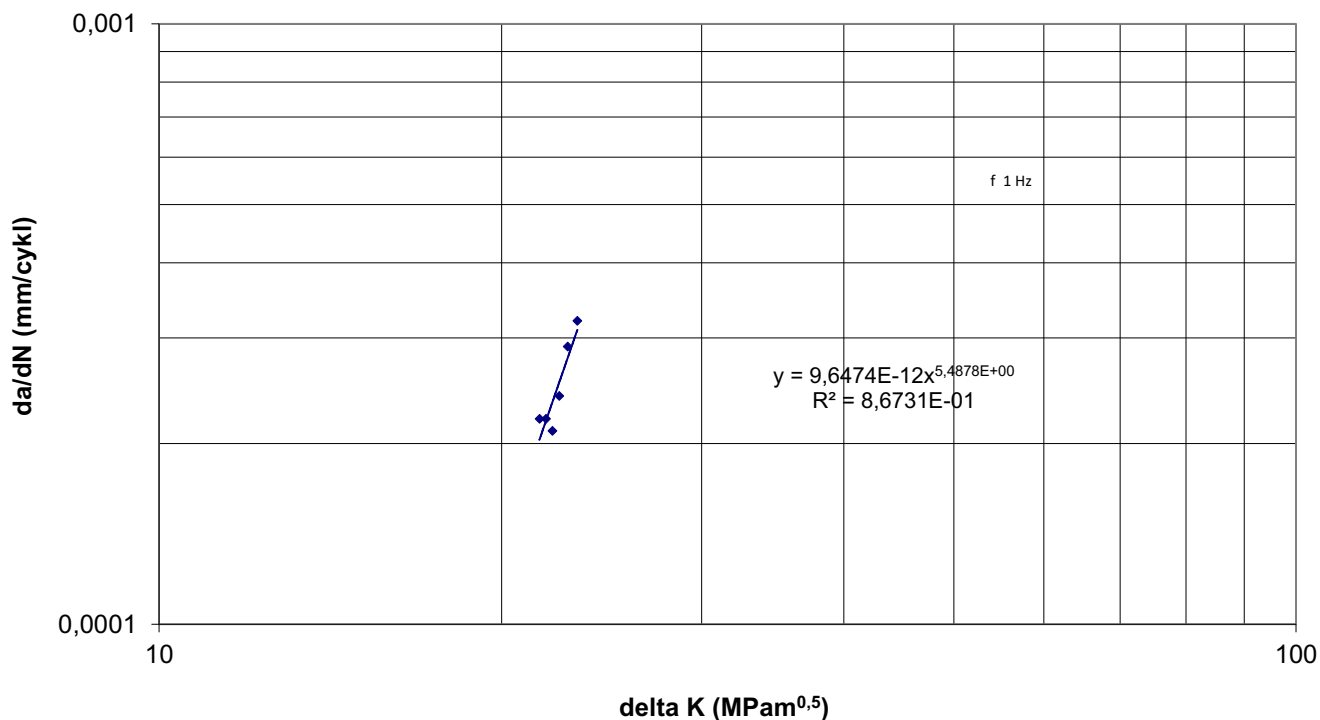
Obr. 12 – Parisova závislost pro vzorek P355 2.1

**P355 2.2**



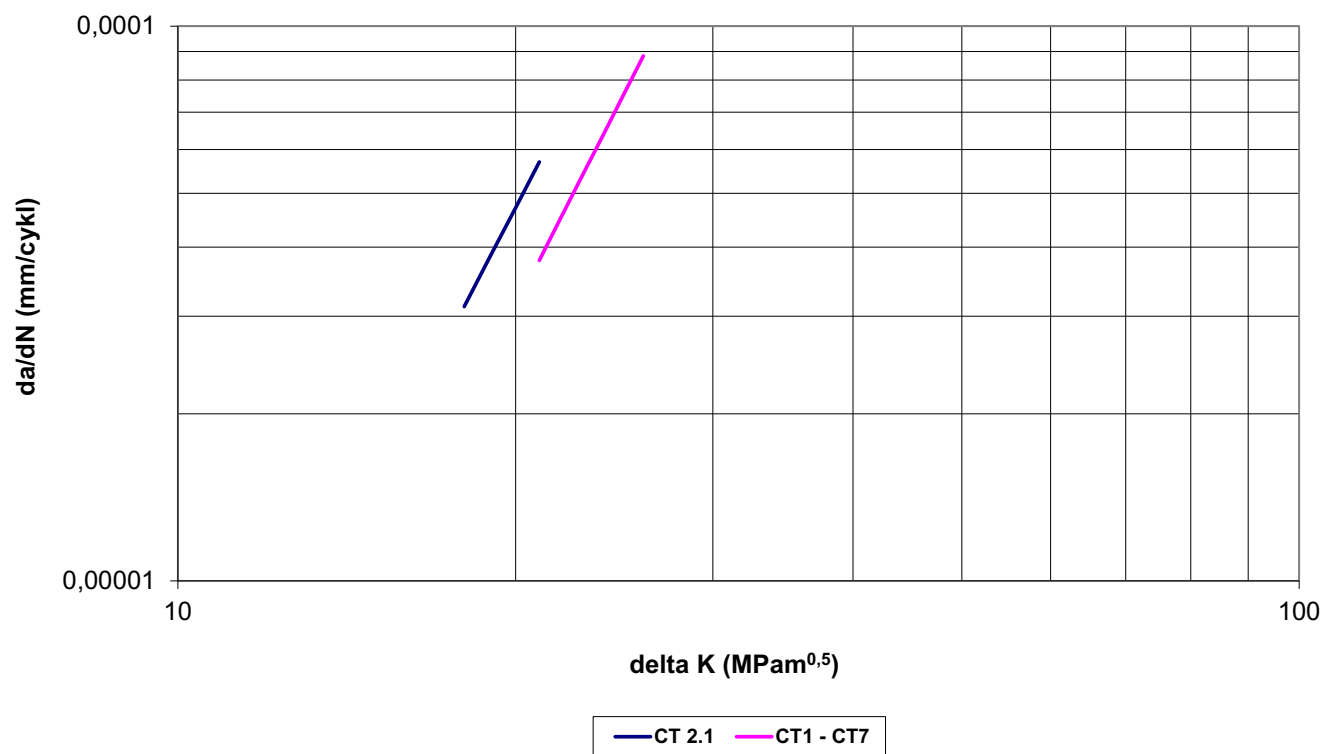
Obr. 13 – Parisova závislost pro vzorek P355 2.2

**P355 2.3**



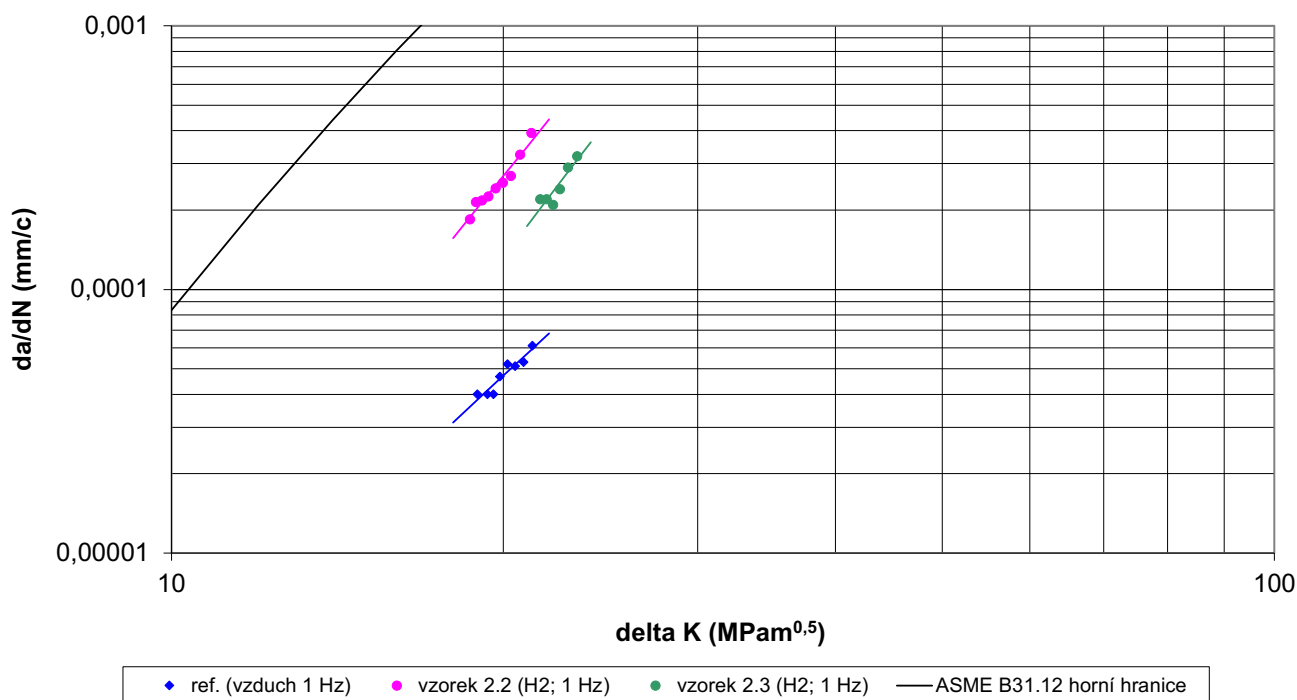
Obr. 14 – Parisova závislost pro vzorek P355 2.3

**P355; referenční**



Obr. 15 – Porovnání Parisovy křivky pro vzorek CT 2.1 ( $f = 1 \text{ Hz}$ ) s Parisovou křivkou získanou na sedmi CT vzorcích při frekvenci  $\sim 100 \text{ Hz}$

## P355



Obr. 16 – Porovnání rychlosti růstu únavových trhlin ve vodíku a na vzduchu

kové vodě. U těchto vzorků byl také stanovován obsah absorbovaného vodíku a následovně bylo experimentálně nastaveno elektrolytické sycení tak, aby byl objem vodíku po elektrolyze vzorku přibližně stejný jako při roční expozici v plynném vodíku za výše uvedených podmínek. Tento postup prakticky nahrazuje dlouhé expozice vzorků v plynném vodíku a umožňuje laboratorně simulovat ve zrychleném procesu vliv času.

Tenzometry, které byly v ponoru v elektrolytu, bylo potřeba chránit proti vlivu bludných proudů a agresivitě procesu elektrolyzy. Pro tento účel se ukázal jako nejlepší izolant včelí vosk, který byl aplikován v rozehřátém stavu na stranu CT vzorku s nalepeným tenzometrem.

Celá sestava sytící komory a vzorku při elektrolytickém sycení je názorně vidět na dvou snímcích, obr. 6. Na komoře pro elektrolyzu bylo umístěno odvětrávací zařízení zapojené do venkovního odtahu z důvodu vývoje chloru při procesu sycení.

#### 4. Výsledky měření růstu únavových trhlin ve vodíku

Jak jsme již uvedli v předchozí kapitole, nárůsty trhlin na CT vzorcích byly měřeny nepřímo pomocí tenzometrického určení poměrné deformace na zadní straně vzorku. Pro přehlednost neuvádíme v článku tabulky nárůstů trhlin během cyklování jednotlivých vzorků. Podobně jako v první části tohoto článku, kde jsme popisovali klasické

zkoušky kinetiky růstu únavových trhlin na skupině sedmi CT vzorků, i zde jsme vyhodnocovali závislost délky trhliny na počtu zatěžovacích cyklů při určité maximální hodnotě síly v cyklu.

Vyhodnocení růstu trhlin během cyklování nám umožnilo určit Parisovy závislosti a znázornit je v log-log souřadnicích jako přímky.

#### Ocel L360NB

Výsledky získané na této oceli jsou prezentovány na obr. 7 (referenční vzorek 1.1), obr. 8 (vzorek 1.2) a obr. 9 (vzorek 1.3).

Použitím Parisovy závislosti na obr. 7 a závislosti na obr. 1, získané klasickým postupem na skupině sedmi vzorků při rezonanční frekvenci zatěžujícího stroje ( $f \sim 100$  Hz), můžeme porovnat vliv frekvence zatěžování na rychlost růstu únavové trhliny, viz obr. 10.

Z diagramu na obr. 10 je zřejmé, že rychlost růstu únavové trhliny je větší při nižší frekvenci. Při nižší frekvenci je totiž k dispozici delší čas jednak pro rozvoj plastické deformace před čelem trhliny, ale také pro uplatnění vlivu prostředí na růst trhliny. Zatímco plastická deformace před čelem trhliny má za následek vznik tlakového napětí při odlehčovacím půlcyklu, a tím i snížení rozkmitu faktoru intenzity napětí a následně nižší rychlost růstu únavové trhliny, vliv prostředí (vlhkost, kyslík) může výrazně urychlit růst trhliny chemickou reakcí s čerstvě odhaleným povrchem na čele

trhliny, takže předčí vliv zbytkového tlakového napětí. Dle obr. 10 je rychlost růstu únavové trhliny při frekvenci  $f = 1$  Hz asi 1,44x větší než při frekvenci  $f \sim 100$  Hz.

Jaký je vliv vodíku na rychlost šíření únavové trhliny? K tomu vyjádříme závislost  $da/dN - \Delta K$  pro vzorky CT 1.1, CT 1.2 a CT 1.3 na jednom diagramu – viz obr. 11. Odsud je zřejmé, že rychlost růstu únavové trhliny ve vodíku je ve srovnání s rychlostí růstu na vzduchu asi 4,5 (CT 1.3) až 7,5 (CT 1.2) krát větší. Hodnoty Parisových exponentů jsou u všech vzorků přibližně stejné, takže zvýšené rychlosti růstu únavových trhlín jsou způsobené hlavně vyššími hodnotami Parisových konstant C. Stojí dále za povšimnutí, že podle obr. 11 jsou u obou vzorků cyklování ve vodíku rychlosti růstu únavové trhliny odlišné. Asi 2x vyšší rychlost lze pozorovat u vzorku CT 1.2, který byl zatěžován maximální silou v cyklu  $F_m = 2,8$  kN, na rozdíl od vzorku CT 1.3, který byl zatěžován maximální silou v cyklu  $F_m = 3,2$  kN. To znamená, že větší rychlost růstu únavové trhliny byla zaznamenána paradoxně u cyklu s menší úrovní maximální síly.

Tento paradox souvisí pravděpodobně s efektem přetížení vzorku 1.3. U tohoto vzorku byla vždy po aplikaci určitého počtu cyklů snížena úroveň síly z hodnoty 3,2 kN na 2,8 kN pro měření délky trhliny. Poté se ale síla opět zvýšila na hodnotu 3,2 kN v rámci dalšího cyklického zatěžování. Právě jednorázové zvýšení zatížení z 2,8 kN na 3,2 kN působí jako přetížení, které vyvolá vznik plastické deformace před čelem trhliny. Odpovídající plastická zóna je výrazně větší než zóny, které by se tvořily při běžném cyklickém zatěžování v režimu 0,32–3,2 kN. Při dalším cyklování způsobuje zvětšená plastická zóna vznik zbytkových tlakových napětí na čele trhliny při odlehčovacím půlcyklu. Zbytkové tlakové napětí působí proti síle, která se snaží trhlínu rozevřít, čímž snižuje maximální sílu na čele trhliny, a tedy i rozkmit faktoru intenzity napětí  $\Delta K$ . Protože je  $\Delta K$  nižší, růst trhliny se zpomalí, dokud trhlina neproroste celou plastickou zónou, vytvořenou přetížením. Na obr. 11 je znázorněna i horní hranice závislosti  $da/dN$  vs.  $\Delta K$  dle normy ASME B31.12 [5]. Jedná se o bezpečnostní hranici, určující maximální provozní podmínky potrubních systémů pro vodík. V uvažovaném případě se jedná o maximální rychlost růstu únavové trhliny ve vodíku pro určitý rozkmit faktoru intenzity napětí  $\Delta K$ . Jak lze pozorovat na obr. 11, bezpečnostní hranice vysoce přesahuje Parisovy křivky určené pro ocel L360NB.

Lze si povšimnout, že u této oceli mají všechny Parisovy přímky přibližně stejné sklony, jak vyplývá z průměrné hodnoty Parisova exponentu  $n = 4,915$  a směrodatné odchylky  $s = 0,1378$ .

### Ocel P355

Podobně jako u vzorků z oceli L360NB nám vyhodnocení růstu trhlín během cyklického zatěžování umožnilo i u této oceli zkonstruovat Parisovy závislosti ve formě přímek v log-log souřadnicích s určením Parisových parametrů

C a n. Parisovy přímky jsou uvedeny na obr. 12 (CT 2.1), obr. 13 (CT 2.2) a obr. 14 (CT 2.3).

Zde jsou k dispozici i Parisovy závislosti získané klasickým postupem na skupině sedmi vzorků při rezonanční frekvenci zatěžujícího stroje ( $f \sim 100$  Hz). To nám umožňuje porovnat vliv frekvence zatěžování na rychlost růstu únavové trhliny, viz obr. 15.

Jak je z tohoto obrázku patrné, rychlost růstu únavové trhliny u vzorku CT 2.1 ( $f = 1$  Hz) je asi 1,55krát větší než u skupiny vzorků CT1–CT7, zatěžovaných při frekvenci  $f \sim 100$  Hz.

Nás ale hlavně zajímá, jak se změní rychlost šíření únavové trhliny ve vodíku. K tomu vyjádříme závislosti  $da/dN - \Delta K$  pro vzorky CT 2.1, CT 2.2 a CT 2.3 na jednom diagramu – viz obr. 16.

Ve srovnání s rychlostí růstu únavové trhliny na vzduchu je rychlost růstu ve vodíku větší asi 2,5 (CT 2.3) až 5,8 (CT 2.2) krát. Jako u oceli L360, i zde se liší výsledky mezi oběma vzorky zatěžovanými ve vodíku (CT 2.2 a CT 2.3). Větší rychlost růstu únavové trhliny byla zaznamenána u cyklu s menší úrovní maximální síly. Tento paradox jsme již vysvětlili u oceli L360NB. U vzorku 2.3 byla vždy po aplikaci jistého počtu cyklů snížena úroveň síly z hodnoty 3,2 kN na 2,8 kN pro měření délky trhliny. Její následovné jednorázové zvýšení z 2,8 kN na 3,2 kN působilo přetěžujícím účinkem, vyvolávajícím vznik plastické deformace před čelem trhliny. Zvětšená plastická zóna vyvolala následně zbytkové tlakové napětí na čele trhliny při odlehčovacím půlcyklu. V konečném důsledku došlo ke snížení rozkmitu faktoru intenzity napětí  $\Delta K$  a tím i ke snížení rychlosti růstu únavové trhliny.

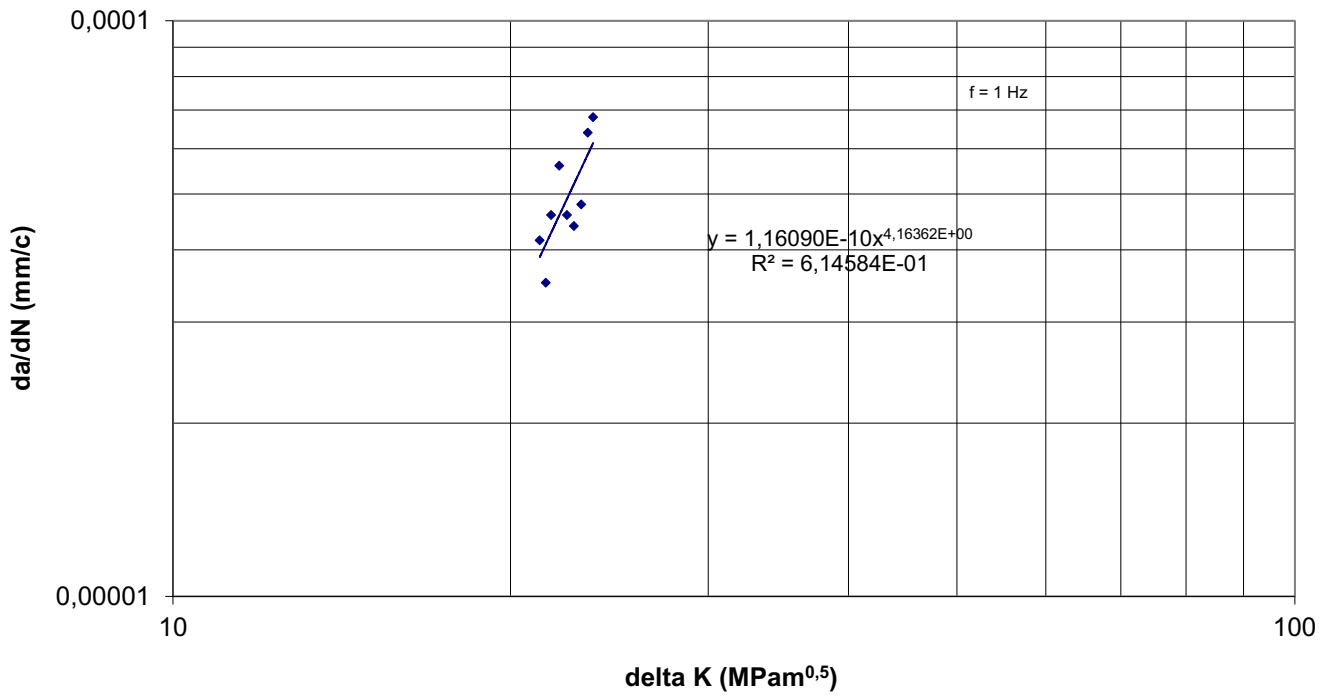
### Ocel 42CrMo4

Jak již bylo poznamenáno, kvůli poškození jsme vzorek 42CrMo4 3.2 ke zkouškám nepoužili.

U této oceli byl referenční vzorek zatěžován cykly s maximální silou  $F_m = 3,2$  kN. Pro tuto sílu byla uskutečněna i kalibrace délky trhliny. To znamená, že vzorek CT 3.3, zatěžovaný maximální hodnotou síly v cyklu  $F_m = 3,6$  kN, byl před každým měřením délky trhliny odlehčen na sílu 3,2 kN. Získané Parisovy závislosti jsou uvedeny na obr. 17 (CT 3.1) a obr. 18 (CT 3.3).

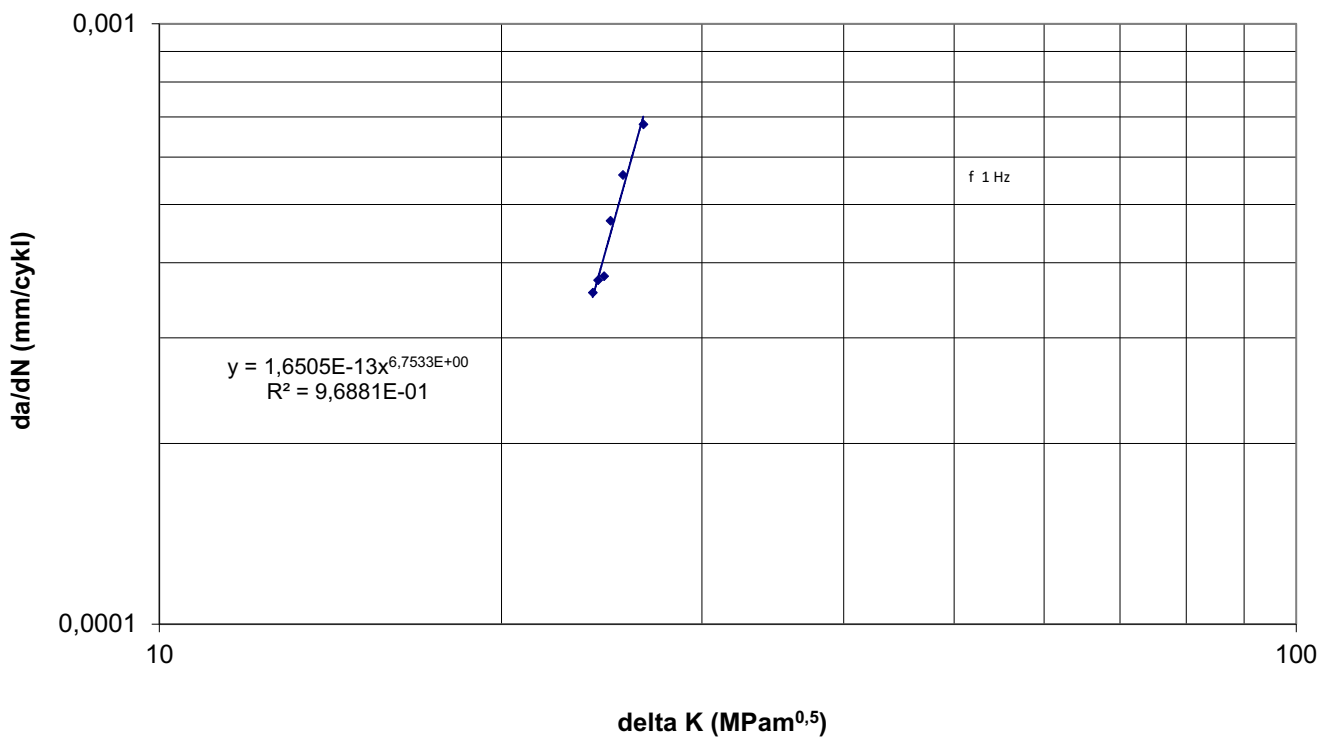
U Parisovy závislosti na obr. 18 lze pozorovat výrazně vyšší hodnotu Parisova mocnitele ( $n=6,753$ ) než u Parisových závislostí pro oceli L360NB a P355. Lze se domnívat, že tomu je tak proto, že v úzkém použitém rozsahu rozkmitu faktoru intenzity napětí  $\Delta K = 24 - 27$  MPa $m^{0,5}$  se v přítomnosti vodíku u této oceli projevil přechod k vyšší rychlosti růstu únavové trhliny, jak popisují autoři práce [6]. Je zřejmé, že pro přesnější určení zákonitosti rychlosti růstu únavové trhliny je nutné vést zkoušky kinetiky růstu únavové trhliny v mnohem širším rozpětí rozkmitů faktoru intenzity napětí.

**CrMo 3.1 (referenční)**



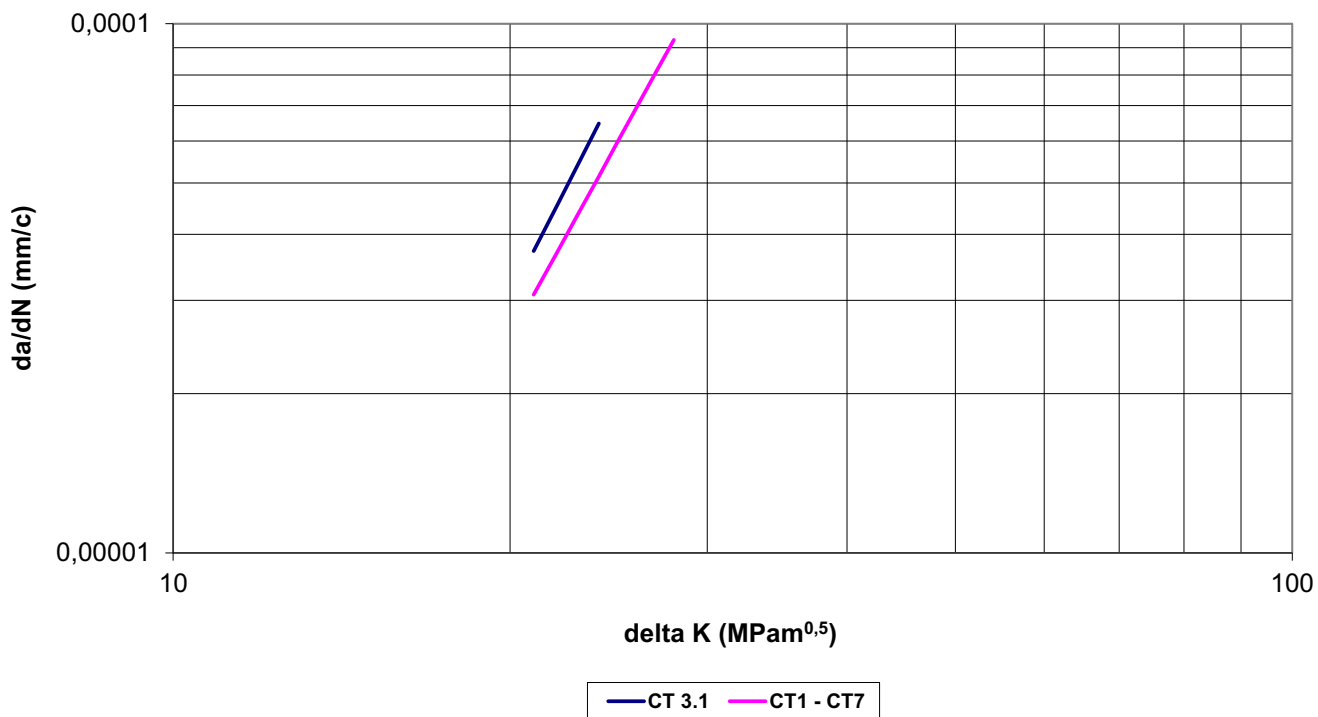
Obr. 17 – Parisova závislost pro vzorek CrMo 3.1

**CrMo 3.3**



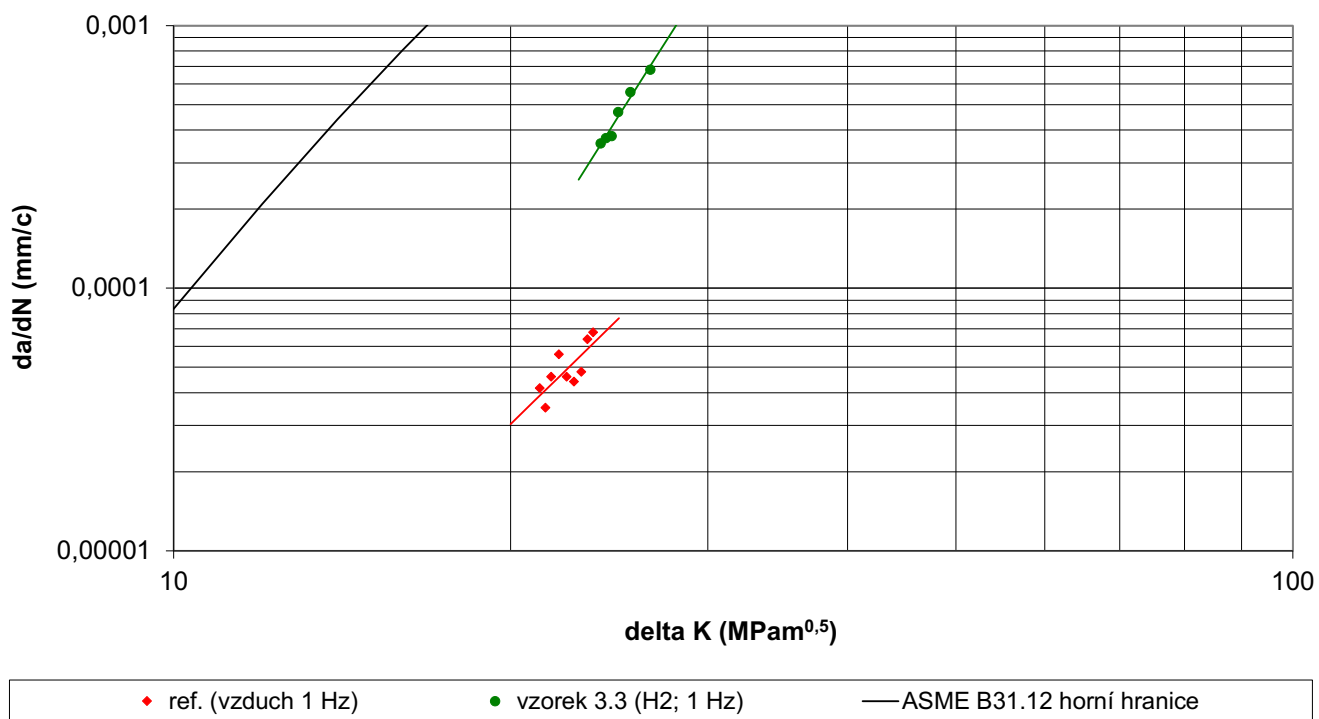
Obr. 18 – Parisova závislost pro vzorek CrMo 3.3

### 42CrMo4 referenční



Obr. 19 – Porovnání Parisovy křivky pro vzorek CT 3.1 ( $f = 1$  Hz) s Parisovou křivkou získanou na sedmi CT vzorcích při frekvenci  $\sim 100$  Hz

### 42CrMo4



Obr. 20 – Porovnání rychlosti růstu únavových trhlin ve vodíku a na vzduchu

Z analogie výsledků rychlosti růstu únavové trhliny ve vodíku u předchozích dvou materiálů se jeví pravděpodobné, že rychlost růstu únavové trhliny ve vzorku CT 3.3 je menší, než by byla při zatěžování chybějícího vzorku CT 3.2 v mezích 0,32–3,2 kN. Důvodem je snižování síly z hodnoty 3,6 kN na 3,2 kN při každém přerušení cyklování za účelem měření délky trhliny. Na dalším obrázku (obr. 19) je porovnání Parisovy závislosti pro vzorek CT 3.1 ( $f = 1$  Hz) s Parisovou závislostí získanou na sedmi CT vzorcích (CT1–CT7) při frekvenci  $\sim 100$  Hz.

I zde se potvrzuje, že únavové trhliny se šíří rychleji při nižší frekvenci cyklického zatěžování. Vliv vodíku na šíření únavové trhliny v oceli 42CrMo4 je demonstrován na obr. 20, kde jsou zobrazeny Parisovy přímky získané na CT vzorku 3.1 (vzduch) a na CT vzorku 3.3 (vodík).

U této oceli lze pozorovat poměrně velký rozdíl ve sklonu Parisovy přímky při zatížení na vzduchu ( $n = 4,164$ ) a Parisovy přímky při zatížení ve vodíku ( $n = 6,753$ ). Proto je zde rychlost růstu únavové trhliny ve vodíku asi 3,3krát větší než na vzduchu pro  $\Delta K = 20$  MPam<sup>0.5</sup> a asi 9,5krát větší pro  $\Delta K = 30$  MPam<sup>0.5</sup>.

Výsledky měření rychlosti únavových trhlin jsou přehledně uvedeny v tabulce 7 pro ocel L360NB, v tabulce 8 pro ocel P355 a v tabulce 9 pro ocel 42CrMo4.

Z Parisových parametrů  $C$ ,  $n$ , uvedených v tabulkách 7–9, můžeme určit násobek zvýšení rychlosti růstu únavových trhlin ve vodíku vzhledem k rychlosti na vzduchu. Protože se tento násobek může lišit pro různé hodnoty rozkmitu faktoru intenzity napětí v důsledku rozdílnosti Parisových exponentů, zvolíme dvě hodnoty rozkmitu faktoru intenzity napětí a pro tyto hodnoty určíme násobky zvýšení rychlosti růstu únavových trhlin. Vzhledem k získaným

výsledkům u jednotlivých ocelí zvolíme  $\Delta K_1 = 20$  MPam<sup>0.5</sup> a  $\Delta K_2 = 30$  MPam<sup>0.5</sup>. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 10, kde je symbolem  $\xi$  označen násobek zvýšení rychlosti růstu únavových trhlin, a to  $\xi_1$  pro  $\Delta K_1 = 20$  MPam<sup>0.5</sup> a  $\xi_2$  pro  $\Delta K_2 = 30$  MPam<sup>0.5</sup>.

Z tabulky plyne, že u oceli L360NB jsou násobky  $\xi$  přibližně stejné u obou hodnot rozkmitu faktoru intenzity napětí, tedy  $\Delta K_1$  a  $\Delta K_2$ . Je to dáno velmi blízkými hodnotami Parisova exponentu. U vzorku s opakovaným přetížením (CT 1.3) je násobek  $\xi$  poloviční. Zhruba poloviční hodnota násobku  $\xi_1$  je i u oceli P355 (vzorek CT 2.3). Přibližně trojnásobné zvýšení násobku  $\xi$  lze pozorovat u oceli 42CrMo4 při zvýšení rozkmitu faktoru intenzity napětí z hodnoty  $\Delta K_1=20$  MPam<sup>0.5</sup> na  $\Delta K_2=30$  MPam<sup>0.5</sup>. Toto je v důsledku velkého rozdílu Parisových exponentů u vzorků CT 3.3 a CT 3.1.

## 5. Diskuse výsledků

Z výsledků měření kinetiky růstu únavových trhlin jednoznačně vyplývá nepříznivý vliv vodíku na rychlost růstu únavových trhlin. Výsledky ve vodíku byly sice získány pouze na dvou CT vzorcích (oceli L360NB a P355) a u oceli 42CrMo4 dokonce jenom na jednom vzorku, nicméně tyto výsledky potvrdily zrychlený růst únavových trhlin ve srovnání s rychlostí růstu trhlin na vzduchu. Protože se dále prokázalo, že rychlost růstu únavových trhlin na vzduchu je závislá na frekvenci zatěžování (s klesající frekvencí zatěžování se rychlost růstu zvyšuje), bylo porovnání rychlostí ve vodíku a na vzduchu uskutečněno při stejné frekvenci 1 Hz.

Pokud označíme výsledky získané na vzduchu jako referenční, dostaneme dvě referenční závislosti: první (základní) odpovídající frekvenci  $\sim 100$  Hz a druhou

**Tabulka 7 – Parisovy konstanty pro ocel L360NB**

Ocel L360NB		
vzorek	C	n
1.1	$1,209 \cdot 10^{-11}$	5,022
1.2	$1,098 \cdot 10^{-10}$	4,964
1.3	$1,006 \cdot 10^{-10}$	4,760

**Tabulka 8 – Parisovy konstanty pro ocel P355**

Ocel P355		
vzorek	C	n
2.1	$4,088 \cdot 10^{-10}$	3,890
2.2	$4,860 \cdot 10^{-11}$	5,184
2.3	$9,647 \cdot 10^{-12}$	5,488

Tabulka 9 – Parisovy konstanty pro ocel 42CrMo4

Ocel 42CrMo4		
vzorek	C	n
3.1	$1,161 \cdot 10^{-10}$	4,164
3.3	$1,650 \cdot 10^{-13}$	6,753

Tabulka 10 – Hodnoty násobku zvýšení rychlosti růstu únavových trhlin ve vodíku

ocel	poměr da/dN	násobek $\xi_1$ pro $\Delta K_1=20 \text{ MPam}^{0,5}$	násobek $\xi_2$ pro $\Delta K_2=30 \text{ MPam}^{0,5}$
L360NB	CT 1.2/CT 1.1	7,6	7,5
	CT 1.3/CT 1.1	3,8	3,4
P355	CT 2.2/CT 2.1	5,7	9,7
	CT 2.3/CT 2.1	2,8	5,4
42CrMo4	CT 3.3/CT 3.1	3,3	9,5

odpovídající frekvenci 1 Hz. Již jsme uvedli, že vyšší rychlost růstu únavové trhliny při nižší frekvenci souvisí pravděpodobně s delším časem pro uplatnění vlivu prostředí (vlhkost, kyslík), které může výrazně urychlit růst trhliny chemickou reakcí s čerstvě odhaleným povrchem na čele trhliny.

U vzorků CT 1.3 (L360NB), CT 2.3 (P355) a CT 3.3 (42CrMo4) se uplatnil vliv přetížení v souvislosti se snížením síly na měřicí úroveň při odečtech aktuálních délek trhliny a následným zvýšením síly (to znamená přetížením vzhledem k předchozímu stavu) do cyklického zatěžovacího režimu. Vzniklá plastická oblast vyvolala následně zbytkové tlakové napětí na čele trhliny, které vedlo ke snížení rozkmitu faktoru intenzity napětí a tím také ke snížení rychlosti růstu únavové trhliny.

Zvýšení rychlosti růstu únavových trhlin ve vodíku vzhledem k rychlosti růstu na vzduchu závisí nejen na Parisových parametrech, ale i na rozkmitu faktoru intenzity napětí. Pokud jsou však Parisovy exponenty u vzorku ve vodíku a vzorku na vzduchu velmi blízké, je násobek zvýšení rychlosti růstu únavové trhliny ve vodíku  $\xi$  nezávislý na rozkmitu faktoru intenzity napětí. Vypočtené hodnoty násobku zvýšení rychlosti růstu únavových trhlin ve vodíku  $\xi$  ukázaly, že u vzorků, které byly násobně přetěžovány během cyklování (podle počtu odečtení aktuální délky trhliny) byl násobek  $\xi$  zhruba poloviční vzhledem ke vzorkům, které byly cyklicky zatěžované na měřicí silové úrovni. Nejvyšší hodnotu násobku  $\xi$  vykázal vzorek CT 2.2 (ocel P355) pro  $\Delta K_2 = 30 \text{ MPam}^{0,5}$ , a sice  $\xi_2 = 9,7$ , a hned za ním vzorek CT 3.3 (ocel 42CrMo4) s hodnotou  $\xi_2 = 9,5$ . Pokud by však byl u této oceli zatěžován vzorek cyklicky s maximální silou v cyklu  $F_m = 3,2 \text{ kN}$ , to znamená, že by byl vyloučen retardační efekt přetížením, přesáhl by násobek  $\xi_2$  hodnotu 9,7.

## 6. Závěr

Při zkouškách kinetiky růstu únavových trhlin způsobuje tenzometrické měření délky trhliny na nižší úrovni síly, než je její horní úroveň v zatěžovacích cyklech, zpomalení růstu únavové trhliny, což má za následek nekonzervativní výsledky.

Příčinou zpomalení růstu trhliny je přetížení vzorku při přechodu do cyklického režimu zatěžování s vyšší horní úrovní síly.

U budoucích zkoušek je proto potřebné vytvořit kalibrační křivky „délka trhliny – poměrná deformace“ pro každou vybranou úroveň síly.

Přesto, že zkoušky kinetiky růstu únavových trhlin byly uskutečněny jen na výrazně omezeném počtu CT vzorků, jejich výsledky jednoznačně poukazují na nepříznivý vliv vodíku na rychlost růstu únavových trhlin.

Při rozkmitu faktoru intenzity napětí  $\Delta K = 20 \text{ MPam}^{0,5}$  se rychlost růstu únavové trhliny u oceli L360NB zvýšila 7,6krát a u oceli P355 5,7krát. U oceli 42CrMo4 bylo toto zvýšení menší a činilo jenom 3,3násobek. Bylo tomu tak proto, že u této oceli docházelo k násobnému přetěžování CT vzorku po každém měření délky trhliny a tím ke zpomalování růstu únavové trhliny.

Zkoušky kinetiky růstu únavových trhlin na vzduchu prokázaly, že snížení frekvence cyklického zatěžování vede ke zvýšení rychlosti růstu únavové trhliny. U oceli L360NB se při snížení frekvence z hodnoty  $\sim 100 \text{ Hz}$  na 1 Hz konkrétně jednalo o 1,44násobné zvýšení rychlosti růstu, u oceli P355 o 1,55násobné zvýšení a u oceli 42CrMo4 o 1,3násobné zvýšení.

Hlavní dopady nepříznivých účinků vodíku na bezpečnost a integritu plynovodů přepravujících vodík nebo jeho směs se zemním plynem se projeví ve dvou směrech, a to ve snížené lomové houževnatosti oceli plynovodu a ve zvýšené rychlosti růstu únavové trhliny v této oceli. Zatímco první faktor sníží kritickou hloubku trhliny, druhý faktor sníží dobu nebo počet cyklů potřebných pro dosažení kritické hloubky, takže výsledkem bude výrazné zkrácení životnosti plynovodu.

- [3] A. Alvaro, Di Wan, V. Olden and A. Barnoush: Hydrogen enhanced fatigue crack growth rates in a ferritic Fe-3 wt% Si alloy and a X70 pipeline steel. Engineering Fracture Mechanics, 2019, Vol. 219
- [4] E 647-15: „Standard Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates“. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2015
- [5] ASME B31.12: „Hydrogen Piping and Pipelines“, 2023
- [6] K. Nibur, B. Somerday, and C. San Marci: Hydrogen-assisted fatigue crack growth. Optimization of fatigue test methods. SAND2011-0593C, Conference Proceeding 2011, Sandia National Laboratories, USA

## Literatura

- [1] L. Gajdoš, M. Šperl a F. Šorm: Vliv vodíku na mechanické a lomově mechanické vlastnosti potrubní oceli. PLYN/GAS 2024, s. 1–17
- [2] A. Laureys et al.: Use of existing steel pipeline infrastructure for gaseous hydrogen storage and transport: A review of factors affecting hydrogen induced degradation. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 101 (2022) 104534

### Poděkování:

Tato práce vznikla s podporou projektu TAČR č. TK05020150 a v rámci programu Strategie AV21 „Udržitelná energetika“.



### Ing. Lubomír Gajdoš, CSc.

Vystudoval ČVUT v Praze, Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou. Postgraduální studium absolvoval na University College v Londýně. Praktické znalosti z oblasti únavového poškození a mechaniky materiálů získal ve SVÚM Praha a rozšířil je v ÚTAM AV ČR, kde se dlouhodobě věnuje problematice integrity tlakových systémů.



### Ing. Martin Šperl, Ph.D.

Vystudoval Technickou fakultu ČZU v Praze a ČVUT v Praze, Fakultu dopravní - Ústav mechaniky a materiálů. Od roku 1999 pracuje v Ústavu teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd ČR, kde získal znalosti z oboru lomové mechaniky, materiálového inženýrství a experimentální praxi. V současné době je vedoucím Odd. aplikované mechaniky a konstrukcí a současně zástupcem ředitele ústavu.



### Ing. Jan Kec, Ph.D.

Vystudoval na ústavu materiálového inženýrství Fakulty strojní Českého vysokého učení technického v Praze. Od roku 2015 působí ve společnosti SVÚM, a.s., v laboratoři pevnosti a zabývá se problematikou integrity potrubních systémů. Od roku 2020 působí jako vedoucí této laboratoře. Je autorem nebo spoluautorem téměř třiceti publikací v mezinárodních periodikách, které se zaměřují na oblast integrity potrubí, únavy materiálů a komponent.