

FATIGUE ANALYSIS OF DEFECTS IN PIPE WELDS FROM VIEW OF POSITION AND GEOMETRY

J. Němec*, M. Šperl*

Summary: *Cyclic tests with the maximum force in a cycle $F_{max} = 5,5 \text{ kN}$ and the cycle asymmetry ratio $R = F_{min}/F_{max} = 0,1$ were carried out on flat specimens of 5mm in thickness. The specimens were cut out from a weldment of X52 steel sheet $\sim 10\text{mm}$ thick perpendicularly to the weld seam. The results showed that the cyclic strength of a welded joint is strongly dependent not only on the depth of a defect but also on its position. The effect of the weld root appeared to be much more unfavourable than the effect of the weld cap. For blunt cracks of the same depth the life of specimens with cracks in the weld root was shorter by an order than that of specimens with cracks in the weld cap. It is therefore very important in welding to pay an increased attention to mainly the root of the weld.*

1. Úvod

Přítomnost svarových spojů v potrubí bývá velice často spojována s příčinami jejich havárií. Svary jsou ve většině případů nejslabším článkem tohoto konstrukčního celku. Je důležité si uvědomit, že mnoho eventuálních necelistvostí z výroby trub se nachází buď přímo ve svarech, anebo v jejich blízkosti. Jako příklad lze uvést bubliny a vměstky, nebo v horším případě studené spoje a neprůvary kořene. Defekty ve svarech vznikají i během provozu vlivem vysokých zbytkových tahových pnutí. Při spolupůsobení agresivního média a zbytkového tahového pnutí mohou vznikat i poškození koroze pod napětím. Tyto vady snižují jak statickou, tak i cyklickou pevnost svarových spojů. Z hlediska rozložení silového toku při zatížení potrubí vnitřním přetlakem média (např. plynu) působí svar jako napěťový koncentrátor, což přispívá k rozvoji defektů vyskytujících se ve svaru a v jeho blízkém okolí. Výsledky analýz, které ve své knize uskutečnil Němec (1994) ukazují, že koncentrace napětí závisí jak na výšce převýšení svaru, tak i na velikosti eventuálního neprůvaru kořene svaru, nebo velikosti jiného defektu ve svaru.

Nejprůkaznějším způsobem určení vlivu vad ve svarových spojkách na jejich životnost by byly zkoušky reálných těles s přirozenými vadami. Na druhé straně je však nutné vzít v úvahu,

*Prof. Ing. Jaroslav Němec, DrSc., Ing. Martin Šperl: Ústav teoretické a aplikované mechaniky AVČR; Prosecká 76; 190 00 Praha 9; tel.: +420286882121; e-mail: sperl@itam.cas.cz

že tyto zkoušky nelze uskutečnit při stejných podmínkách poškození, neboť přirozené vady nejsou v různých tělesech navzájem identické. Při hodnocení vlivu vad se proto musí vycházet ze zkoušek těles se simulovanými vadami. Z tohoto důvodu byly běžné svarové vady simulovány vadami s předem definovanou geometrií, rozměry a polohou vzhledem ke svarovému švu.

2. Příprava zkušebních vzorků

Z podélně svařované trubky DN 800 (\varnothing 830/10 mm, ocel X52 dle API) byly po obou stranách svaru vyříznuty dvě desky o rozměrech $\sim 10 \times 250 \times 130$ mm. Desky byly dále rovnány pod lisem a následně upraveny jejich kontaktní hrany pro poloviční V-svar. Desky byly svařeny metodou ručního obloukového svařování (ISO 4063-111) obalenou elektrodou ve třech vrstvách. Tato metoda je běžně užívána pro svařování vysokotlakých potrubí. Zdrojem svařovacího proudu byl svařovací usměrňovač WTU 315.34.

Pro svařování kořenové vrstvy byla použita elektroda ESAB Vamberk E-B-122 dle ČSN 055020 a ČSN 055041, o průměru \varnothing 2,5 mm. Jedná se o elektrodu s bazickým obalem určenou pro svařování kořenových housenek rourovodů. Chemické složení svarového kovu: 0,08C; 0,3Si; 1,0Mn. Mechanické vlastnosti svarového kovu: $R_e = \text{min. } 430 \text{ MPa}$, $R_m = 500\text{--}650 \text{ MPa}$, $A_5 = \text{min. } 20\%$, $KCV = \text{min. } 130 \text{ J/cm}^2$ při teplotě $+20^\circ\text{C}$.

Pro svařování výplňové a krycí vrstvy byla použita elektroda ESAB Vamberk E-B-241 dle ČSN 055098 a ČSN 055050, o průměru \varnothing 3,2 mm. Jedná se o elektrodu s bazickým obalem. Chemické složení svarového kovu: 0,06C; 0,3Si; 1,0Mn; 1,0Ni; 0,3Mo. Mechanické vlastnosti svarového kovu: $R_e = 550 \text{ MPa}$, $R_m = 620 \text{ MPa}$, $A_5 = 24\%$, $KV = 130 \text{ J}$ při teplotě $+20^\circ\text{C}$ a 40 J při teplotě -50°C . Všechny použité elektrody byly přesušeny při $300\text{--}350^\circ\text{C}$ po dobu 2 hodin a základní materiál pro svařování nebyl předehřát.

Ze vzniklého svařence byly nařezány jednotlivé zkušební vzorky o tloušťce 5 mm. Pak byla realizována výroba startovacích defektů na vzorcích určených pro iniciaci únavových trhlin ve svaru Elektrojiskrovou metodou. Vyjiskřování trhlin se uskutečnilo na řezače VUMA VJ-4 (Nové Město nad Váhom) při použití následujících parametrů:

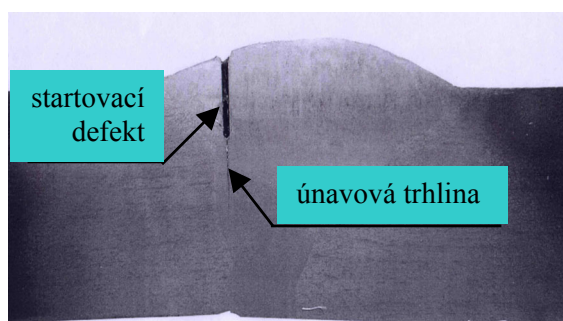
medium -	petrolej
drát -	Cu $\varnothing 0,3 \text{ mm}$
rychlost řezu -	$0,5 \text{ mm}^2/\text{min}$
rychlost pohybu drátu -	50 mm/s
špičkové napětí -	240 Vstupeň 4
šířka impulsu -	$200 \mu\text{s}$stupeň 4

Podle polohy a hloubky vyjiskřené tupé trhliny lze vzorky rozdělit do šesti skupin jejichž charakteristiky jsou uvedeny v tab.1.

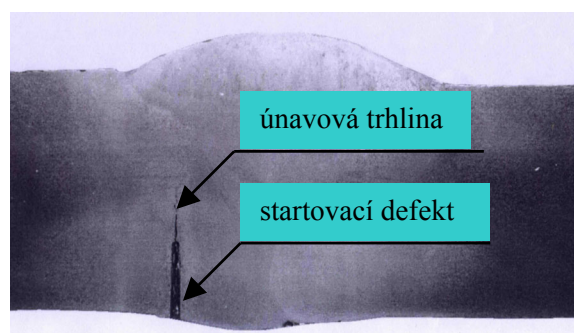
Tab. 1 Charakteristiky skupin vzorků

Skupina	Umístění trhliny	Hloubka trhliny [mm]
1	Čelo	2
2	Kořen	2
3	Čelo	3
4	Kořen	3
5	Čelo	4
6	Kořen	4

Tvar vzorků, umístění tupé trhliny i nárůst ostré únavové trhliny před ukončením zkoušky jsou patrné z metalografických snímků na obr. 1 a 2.



Obr. 1 Metalografický snímek vzorku 3-1 s defektem v čelní části.



Obr. 2 Metalografický snímek vzorku 4-1 s defektem v kořeni svaru

Je nutno podotknout, že na vzorku 5-3 došlo při výrobě tupé trhliny elektrojiskrovou metodou k jejímu chybnému umístění, a proto nebyl tento vzorek uvažován při hodnocení výsledků. (Tupá trhlina byla sice umístěna na lícni straně svaru, ovšem blíže k základní desce se sraženou hranou.) Tvar a typ vzorků vycházejí z práce uveřejněné ve sborníku „Únava materiálů a konstrukcí“ Gajdošem (2000) s tím rozdílem, že defekty nebyly simulovány použitím keramického povlaku CWL 12 (WC+12% Co).

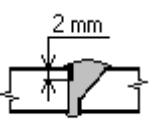
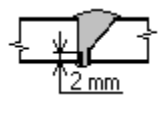
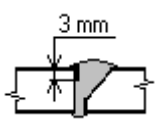
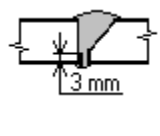
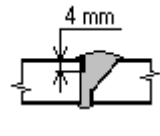
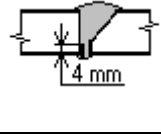
3. Experimentální práce a výsledky

Smyslem cyklických zkoušek bylo posoudit, jak významně se uplatňuje hloubka ostrých povrchových nečistostí (tupých trhlín) na zbytkovou životnost svarových spojů, a do jaké míry je rozhodující jejich poloha.

Zkoušky se uskutečnily na vysokofrekvenčním vibrátoru RUMUL, pracujícím na rezonančním principu, o maximální silové kapacitě 20 kN. Zkoušky byly provedeny v režimu jednoosého zatížení na referenční hladině $F_{\max}=5,5$ kN s hodnotou asymetrie cyklu $R=F_{\min}/F_{\max}=0,1$. Při cyklickém zatěžování byla sledována rezonanční frekvence, jejíž pokles signalizoval růst únavové trhliny z kořene startovacího defektu. Zatěžování probíhalo až do okamžiku, kdy hloubka trhliny dosáhla takové hodnoty, že další zatěžování vzorku

v rezonančním režimu nebylo možné bez drastického snížení amplitudy. Výsledky zkoušek na vzorcích 1-6 jsou uvedeny v tab.2.

Tab. 2 Výsledky únavových zkoušek

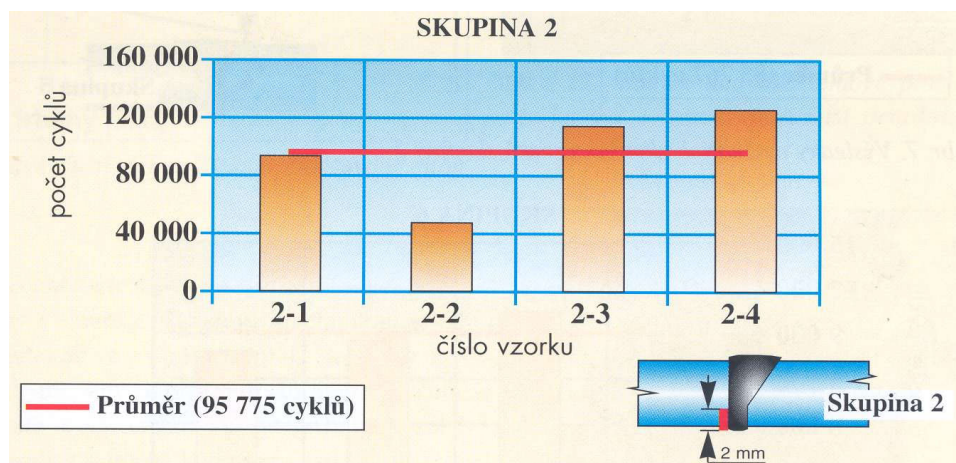
Umístění trhliny	Vzorek č.	h (mm)	Životnost N_f (cykly)	Poznámka
	1-1	2	$> 10^6$	-
	1-2	2	$> 10^6$	-
	1-3	2	120 100	a)
	1-4	2	$> 10^6$	-
	1-5	2	$> 10^6$	-
	2-1	2	94 000	-
	2-2	2	47 000	-
	2-3	2	115 400	-
	2-4	2	126 700	-
	2-5	2	61 500	-
	3-1	3	513 500	-
	3-2	3	509 000	-
	3-3	3	357 300	-
	3-4	3	472 200	-
	3-5	3	632 300	-
	4-1	3	27 500	-
	4-2	3	27 200	-
	4-3	3	27 100	-
	4-4	3	21 300	-
	4-5	3	19 900	-
	5-1	4	66 300	-
	5-2	4	80 600	-
	5-3	4	17 600	b)
	5-4	4	110 400	-
	5-5	4	80 900	-
	6-1	4	8 400	-
	6-2	4	10 800	-
	6-3	4	8 900	-
	6-4	4	7 600	-

Pozn.: a) $F_{max}=7,0$ kN ; b) chybné umístění tupé trhliny

4. Diskuse výsledků

Vzorky skupiny 1 a 2

Vzorky skupiny 1 s tupou trhlinou o hloubce 2 mm na lící straně svaru měly životnost, při dané referenční silové hladině $F_{\max} = 5,5$ kN, větší než 10^5 cyklů. Ani po aplikaci takového počtu cyklů nebyla iniciována únavová trhlina z kořene vyjiskřené tupé trhliny v lící části svaru, ale iniciovala v kořeni svaru, kde nebyla přítomna startovací tupá trhlina. Stojí za zajímavost uvést, že až při výrazném zvýšení úrovně cyklického zatěžování ($F_{\max} = 7,0$ kN) došlo u vzorku 1-3 k únavovému poškození na lící straně svaru v kořeni tupé trhliny. Z toho plyne, že při cyklickém zatěžování na dané referenční silové hladině není únavová pevnost svarového spoje ovlivněna uměle vyrobeným defektem v čelní části svaru o hloubce 2 mm, a naopak je kritickým místem pro vznik únavové trhliny kořen svaru. U vzorků skupiny 2 byly již všechny únavové trhliny iniciovány z čel tupých trhlín umístěných v kořenové části svaru. Výsledky jednotlivých zkoušek vzorků skupiny 2 jsou na obr. 3 ilustrovány formou sloupcových diagramů. Zjištěná průměrná životnost je $\sim 10^5$ cyklů.

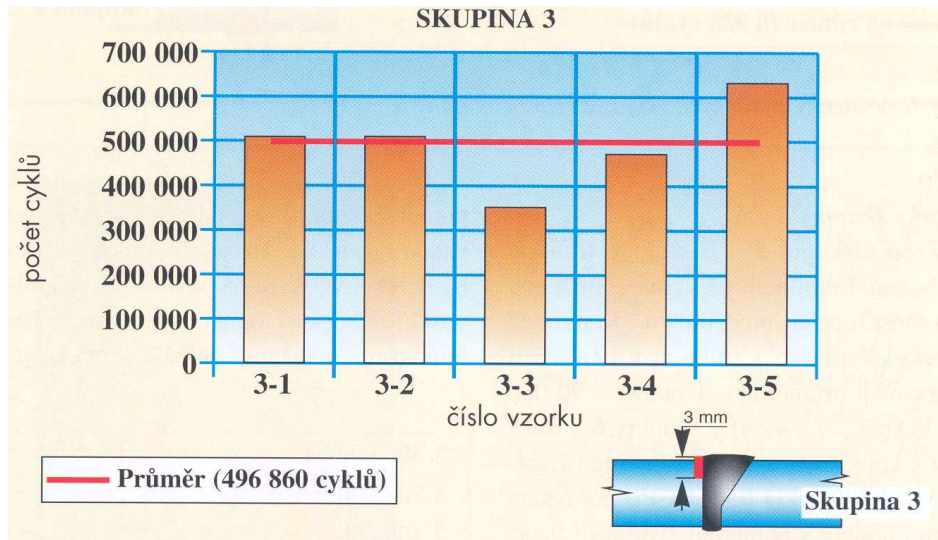


Obr. 3 Výsledky cyklických zkoušek vzorků skupiny 2

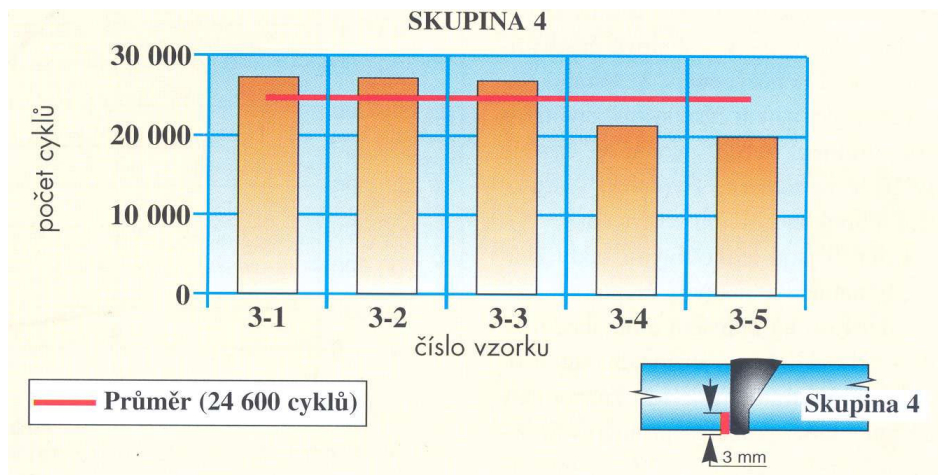
Vzorky skupiny 3 a 4

U třetí skupiny vzorků byla zjištěna průměrná životnost $\sim 500\,000$ cyklů (obr. 4) a všechny únavové trhliny byly iniciovány z tupých trhlín na lící straně svaru. Zde je již, oproti vzorkům skupiny 1, tupá trhlina o hloubce 3 mm (při daném režimu zatěžování) rozhodujícím defektem pro pevnostní spolehlivost svaru.

Životnost vzorků skupiny 4 se stejnou hloubkou tupé trhliny, avšak umístěnou v kořenové části svaru, byla jenom $\sim 25\,000$ cyklů (obr. 5). Porovnáním životností vzorků skupin 3 a 4 zjišťujeme, že jejich poměr je zhruba 20. Tedy životnost svaru při trhlíně 3 mm v kořenové části je pouze 5% z průměrné životnosti svaru se stejným defektem v lící části.



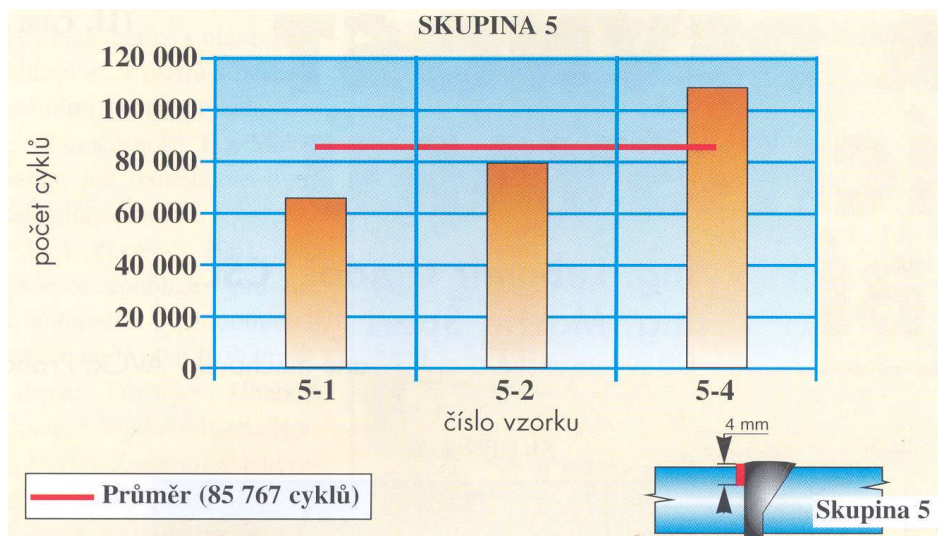
Obr. 4 Výsledky cyklických zkoušek vzorků skupiny 3



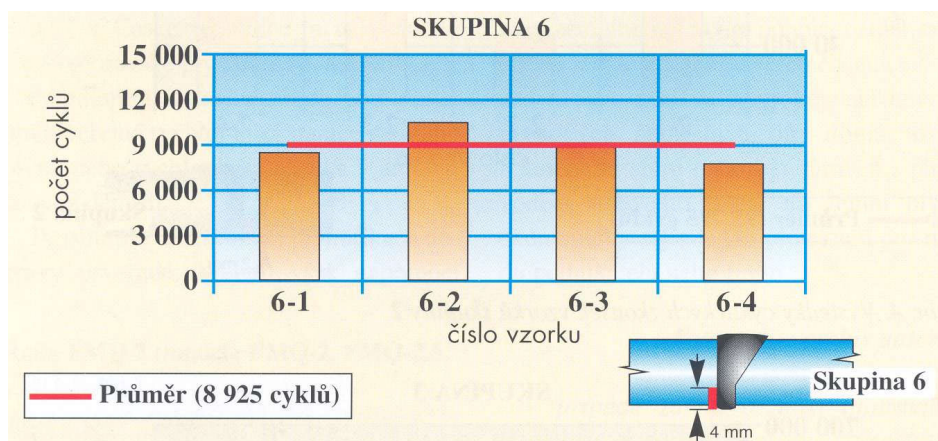
Obr. 5 Výsledky cyklických zkoušek vzorků skupiny 4

Vzorky skupiny 5 a 6

Vzorky skupin 5 a 6 s tupou trhlinou hlubokou 4mm mají již výrazně sníženou životnost oproti předchozím. Konkrétně vzorky skupiny 5 s trhlinou v lící části svaru mají průměrnou životnost ~ 90 000 cyklů (obr. 6) a vzorky skupiny 6 s trhlinou v kořeni svaru mají průměrnou životnost ~ 9 000 (obr. 7). Při porovnání těchto hodnot s poměrem životností vzorků skupin 3 a 4 je jasné, že nebezpečnost vyskytujícího se defektu o hloubce 4 mm v kořeni svaru je nižší, ovšem stále je výskyt takovéto vady v kořenové části přibližně 10 krát nebezpečnější než stejná vada vycházející z lící části svaru. Životnost svaru s trhlinou 4 mm v kořenové části je tedy 10 % z průměrné životnosti svaru se stejně hlubokou trhlinou v lící části.

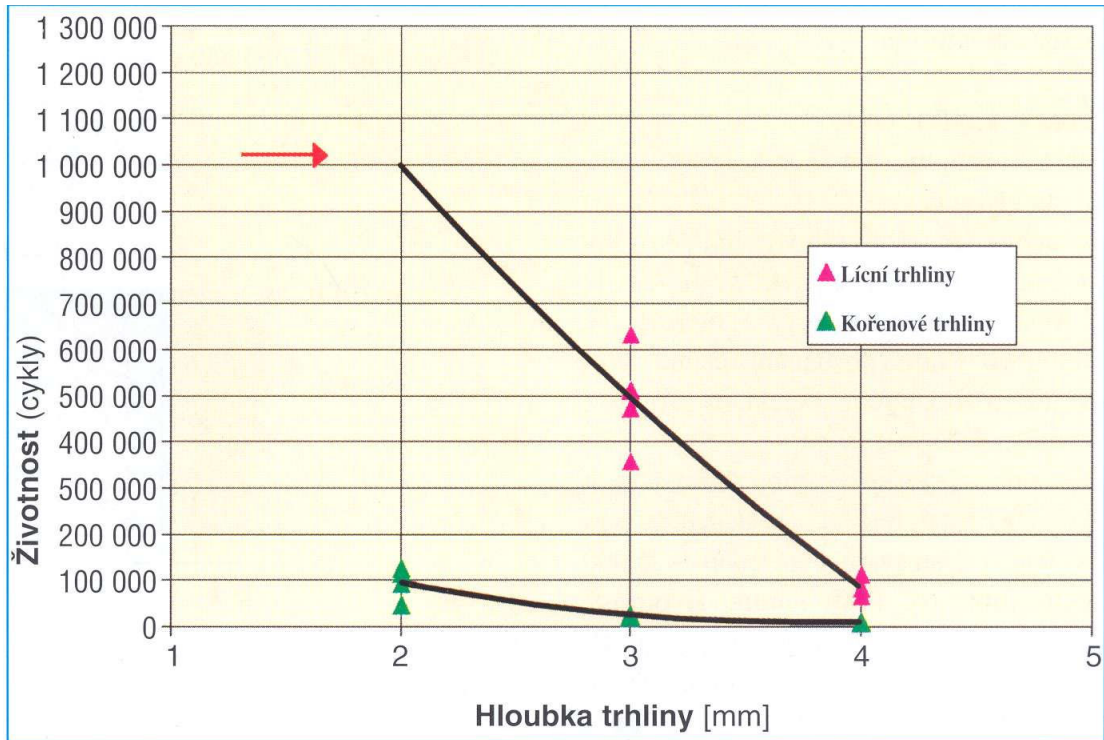


Obr. 6 Výsledky cyklických zkoušek vzorků skupiny 5



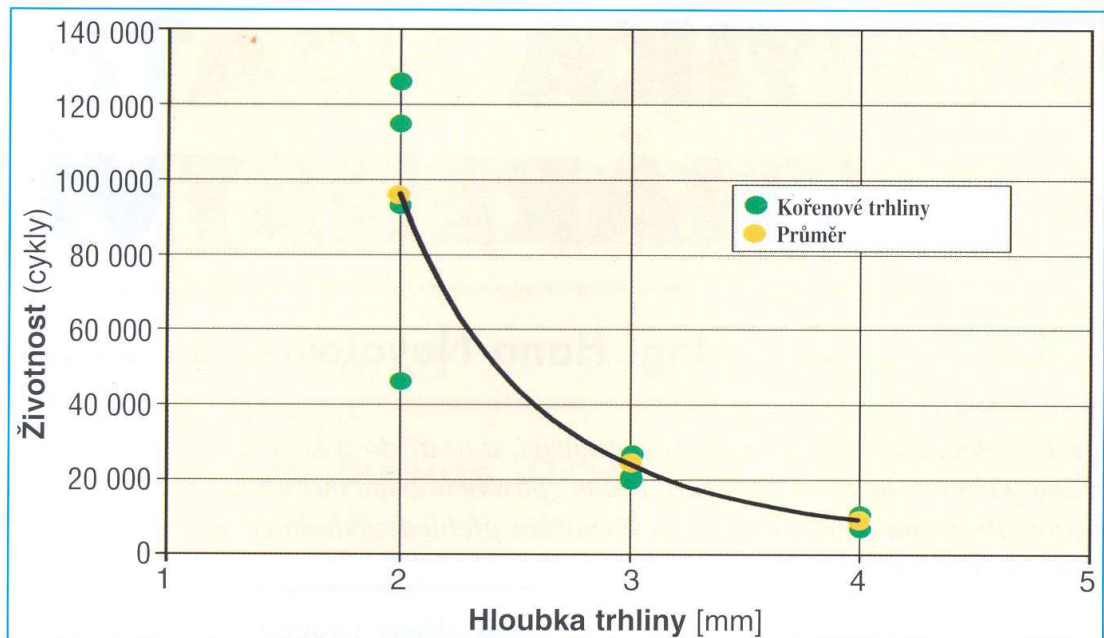
Obr. 7 Výsledky cyklických zkoušek vzorků skupiny 6

Na obr. 8 jsou jednotlivými body znázorněny naměřené hodnoty životností svarů v závislosti na umístění a hloubce tupé trhliny při cyklickém zatěžování danou silou. Plnými čarami jsou zde znázorněny pravděpodobné průběhy průměrných životností vzorků skupin 1 až 6. Z grafu je patrné, že s přibývajícím hloubkou trhliny se poměr životností mezi lící a kořenovou vadou zmenšuje. Tudiž vliv polohy ostrého defektu ve svaru na pevnostní spolehlivost klesá. Oproti tomu i malá trhlina v kořeni svaru podstatně snižuje jeho životnost, kdežto trhlina hluboká 2 mm v lící části není defektem, který by při daném zatěžovacím režimu byl iniciačním pro vznik únavové trhliny, takže se v tomto případě vzorek chová jako bez defektu v lící části svaru.



Obr. 8 Životnost svarů s defekty při cyklickém zatěžování silou $F_{\max}=5,5$ kN, $R=0,1$

Z obr. 9 je patrné, že spojnice průměrných životností svarových spojů s vadou v kořeni svaru také strmě stoupá s ubývající hloubkou defektu.



Obr. 9 Životnost svarů s trhlínami v kořenové části při cyklickém zatěžování silou $F_{\max}=5,5$ kN, $R=0,1$

Tyto výsledky jasně ukazují na mnohem větší nebezpečnost výskytu ostrého defektu typu trhliny v kořenové části svaru než v lící části při cyklickém zatěžování. Snížená únavová pevnost kořenové části svaru je způsobena tím, že v kořeni svaru je vlivem strukturních defektů urychlena fáze počátečního rozvoje trhliny a bariéry proti poskoku trhliny jsou menší.

5. Závěr

Smyslem uskutečněné experimentální studie bylo vyšetřit vliv technologických defektů ve svarech na únavovou životnost svarových spojů potrubí a jiných svařovaných konstrukcí. Vady ve svaru byly simulovány tupými trhlínami vyrobenými elektrojiskrovou metodou.

Výsledky zkoušek jasně dokazují, že cyklická pevnost vzorků je výrazně citlivá nejen na velikost vady, ale i na její polohu. Jednoznačně se ukázalo, že vliv kořene svaru je v tomto směru daleko nepříznivější, než účinek závěrečné housenky svaru a jejího pozvolného přechodu do základního materiálu. Potvrdilo se, že u hlubších trhlín se zmenšují rozdíly nepříznivého vlivu polohy vady na únavovou životnost.

Závěrem je tedy možno konstatovat, že dosavadní výzkum potvrzuje význam technologie svaru a s tím související polohy i hloubky případných technologických defektů ve svarovém spoji. Je proto nezbytné, aby se při svařování potrubí věnovala zvýšená pozornost zajištění vysoké kvality zejména kořenové části svaru.

5. Poděkování

Tato práce vznikla s podporou grantu GA AVČR 2811201

6. Literatura

Němec, J. (1994) *Spolehlivá životnost svařovaných částí*. ČVUT, Praha.

Gajdoš, L. (2000) *Některé poznatky získané při zkoušení velkých potrubí pro další rozvoj lomové mechaniky*. Seminář, Žinkovy.