

INOVATIVNÍ ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ HLOUBKY TRHLIN STŘÍDAVOU POTENCIÁLOVOU METODOU

INNOVATIVE DEVICE FOR MEASURING CRACK DEPTH BY ACPD POTENTIAL METHOD

Jakub Mlnářík, Jan Kec a Petr Chuchvalec

SVÚM a.s.

Abstrakt

Střídavá potenciálová metoda je vhodným nástrojem pro měření hloubky trhlin kovových materiálů. Pro její dostatečně spolehlivé použití je třeba vhodně navrhnout uspořádání měřící části a zejména její připojení ke vzorku. Ve firmě SVÚM byl vytvořen miniaturní měřící modul, který umožňuje citlivé měření v bezprostřední blízkosti u trhliny. Měřící modul je možné použít pro jednorázovou příruční aplikaci i pro dlouhodobé měření velkých konstrukcí. Je možné najednou sledovat i velké množství trhlin, neboť měřící moduly je možné vzájemně propojit do sítě pomocí průmyslové sběrnice.

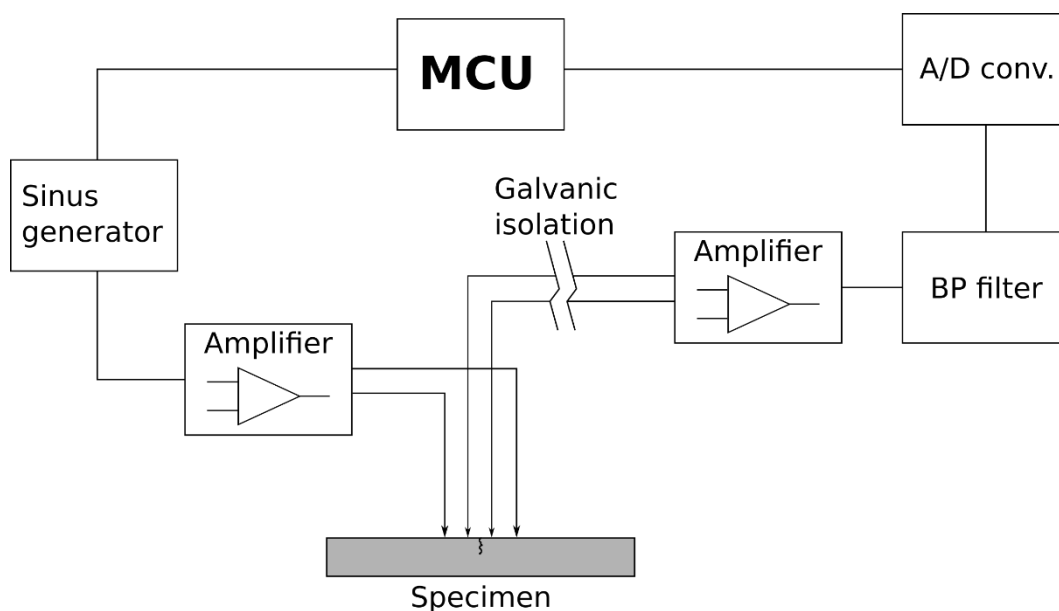
Abstract

The alternating current potential method (ACPD) is a suitable tool for measuring the depth of cracks in metallic materials. For its reliable use, it is necessary to design the arrangement of the measuring part well. Also the connection to the sample must be reliable. A miniature measuring module has been created in the SVÚM company, which enables sensitive measurement of a crack. The measuring module can be used for one-time manual application as well as for long-term measurement of large structures. It is possible to monitor a large number of cracks at once, as the measuring modules can be interconnected into the network using a communication bus.

Princip zařízení

Princip navrhovaného zařízení pro ACPD měření hloubky trhlin je následující (obr. 1): Střídavý budící proud o frekvenci 3 000 Hz je získán pomocí sinus generátoru se zesilovačem. Budící proud ve vzorku může ve špičkách dosahovat až 5 A. Měřený signál je galvanicky oddělen pomocí oddělovacího transformátoru a následně zesílen v předzesilovači s nastavitelným ziskem. Po odfiltrování parazitních frekvencí pomocí band-pass filtru je signál na A/D převodníku digitalizován a počítačově zpracován. Měření probíhá pulzně – proud prochází vzorkem jen krátkou dobu (max. 200 ms) během měření. Parazitní indukovaná složka vznikající v přírodních vodičích ke vzorku je omezena dvěma způsoby:

1. Pár vodičů přivádějící budící proud do vzorku je twistován.
2. Zesilovač budícího signálu a měřící část je miniaturizován a umístěn co nejbližší vzorku. Tímto způsobem je minimalizována délka paralelního vedení silového budícího a měřeného signálu. Právě miniaturizace a tím možné omezení délky vodičů je zásadní výhodou našeho řešení oproti komerčním přístrojům.



Obr. 1: Schematické znázornění zařízení pro měření hloubky trhlin ACPD metodou

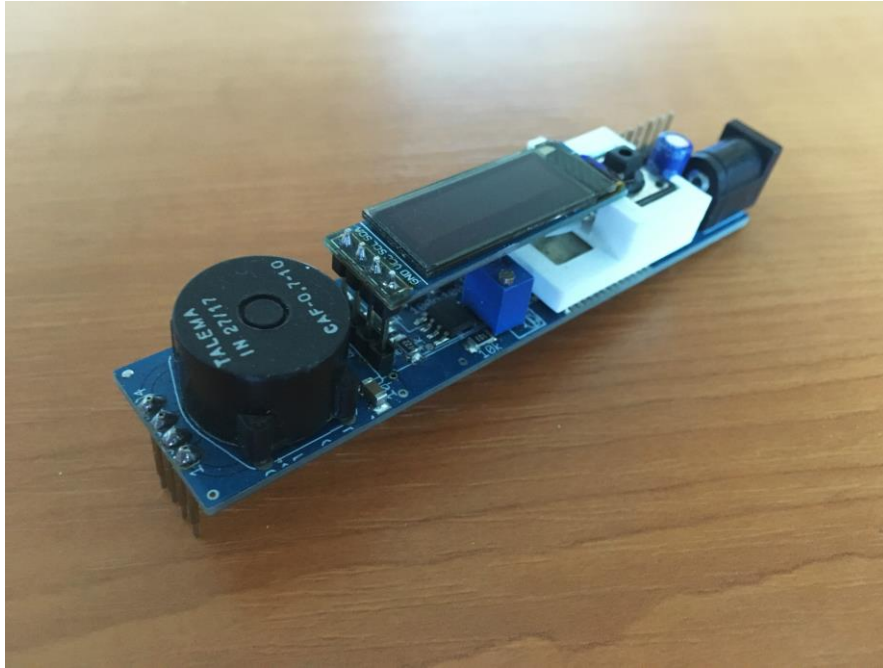
Zařízení pro příruční měření hloubky trhlin

Byl navržen a zkonstruován prototyp miniaturního příručního zařízení, které přímo měří hloubku trhliny. Při návrhu zařízení bylo využito dřívějších poznatků získaných studiemi ACPD metody ve SVÚM – zejména jde o volbu vhodné budící frekvence a matematického postupu výpočtu hloubky trhliny. Základem zařízení (obr. 2) je 4 hrotová sonda – jsou využity odpružené měřící jehly v rozteči 2,5 mm. Vnějšími hroty je vnášen budící proud o frekvenci 3 kHz, vnitřní hroty snímají odezvu napříč měřenou trhlinou. Díky využití odpružených jehel je možné měřit v příručním režimu bez nutnosti bodování elektrod. Budící sinusový signál je generován mikroprocesorem ESP32 pomocí pulzně šířkové modulace pseudo-analogovým výstupem. Budící signál je dále vyhlazen pomocí RC obvodu a vstupuje do audio zesilovače TDA2822D. Úbytek napětí v okolí trhliny je snímán dvojicí měřících elektrod. Měřený signál je zesílen dvojicí operačních zesilovačů s nastavitelným ziskem na druhém stupni a snímán 12bitovým analogovým vstupem procesoru ESP32. Délka jednoho měření je 100 ms, měření se periodicky opakuje každých 900 ms. Součástí zařízení je miniaturní OLED displej pro zobrazení měřených hodnot.

Navržený plošný spoj pro SMD montáž má rozměry 95 x 20 mm. Jsou na něm integrovány veškeré komponenty včetně napájecího konektoru a měřících hrotů.

Byl vytvořen program pro ESP32, který řídí celé měření a zpracování signálu. Je vyřešena automatická detekce kvality připojení (je nutný správný kontakt hrotů s vzorkem), kalibrace zařízení je řešena sadou etalonů s definovanou hloubkou umělých trhlin. Pro proces kalibrace je připraveno jednoduché menu ovládané jediným tlačítkem na zařízení. Velkou výhodou čipu ESP32 je integrovaná anténa pro bluetooth či WiFi komunikaci. Právě bluetooth komunikace je využita pro přenos měřených dat do PC a zápis hodnot při kontinuálním provozu.

Zařízení bylo navrženo tak, aby se po osazení dalo snadno vestavět do krabičky, která byla vyrobena pomocí 3D tiskárny. Součástí krabičky je i dvojice silných neodymových magnetů, které fixují polohu zařízení na ocelový předmět v průběhu měření (obr. 3).



Obr. 2: Osazená deska příručního zařízení – vlevo jsou patrné 4 odpružené měřicí hroty



Obr. 3: Hotový prototyp zařízení při kalibraci na modelové trhlíně

Miniaturizované zařízení pro dlouhodobé měření

Výše měřidlo je výhodné pro rychlá ruční měření. Avšak příkládací odpružené hroty se příliš nehodí pro měření dlouhodobé, kde se očekává vysoká přesnost a stabilita. Pro provádění právě dlouhodobých a provozních měření bylo proto navrženo měřidlo jiné (obr. 4). Základní princip měření je shodný, zařízení se ale liší v několika aspektech:

1. Měřicí kontakty jsou vzorku bodovány. Nejsou tudíž použity odpružené hroty, ale běžná přípojovací svorkovnice.
2. Na měřicím modulu není osazen displej. Tím se dále zmenšila velikost zařízení.
3. Veškerá komunikace s měřicím modulem (kalibrace, odečet hodnot...) se provádí externě pomocí průmyslové sběrnice RS485.

Jednotlivé moduly jsou adresované. Je možné použít až 256 modulů na jedné sběrnici současně. Tak je možné v reálném čase sledovat velké množství defektů na jedné konstrukci. Pro účely kalibrace a sběru dat byl vytvořen program pro operační systém Windows v jazyku C#, v provozních podmínkách lze použít průmyslový PLC automat.



Obr. 4: Miniaturní modul pro kontinuální měření hloubky trhlin

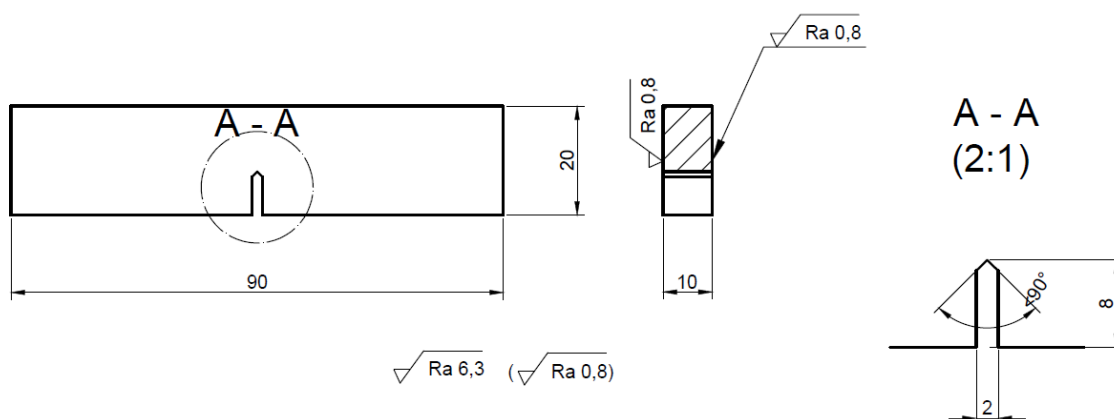
Použití měřidla pro sledování růstu trhliny během únavové zkoušky

Modelová únavová zkouška byla provedena servohydraulickým zkušebním stroji Instron 8501 (obr. 5). Jako zkušební těleso byl použit vzorek typu 3PB (three-point bend specimen) s mechanicky předpřipraveným vrubem s hloubkou 8 mm, který se běžně používá pro zkoušky lomové houževnatosti. Rozteč podpor po celou dobu zkoušení byla stanovena na 80 mm. Zkušební těleso bylo vyrobeno z termomechanicky zpracované potrubní oceli X70 označení dle API 5L. Vzorek byl odebrán z obvodového směru a předpřipravený mechanický vrub byl orientován osově na trubním tělese, čímž simulovat nejkritičtější možnou situaci na potrubním tělese, neboť obvodové napětí je dvojnásobné v porovnání s podélným. Zkušební vzorek s kótami hlavních rozměrů je zobrazen na obr. 6.

Samotná únavová zkouška probíhala ve dvou po sobě jdoucích krocích. V prvním kroku bylo zkušební těleso zatěžováno frekvencí $f = 10$ Hz, amplitudou síly $F_a = 3,9$ kN a statickým předzátížením $F_{stat.} = 4,7$ kN, což odpovídá asymetrii zatížení $R = 0,093$. Stanovená únavový přírůstek během tohoto kroku byl stanoven na 3 mm. V druhém kroku byla zatěžovací síla snížena zhruba na polovinu – zatěžovací frekvence $f = 10$ Hz, amplituda síly $F_a = 2,0$ kN a statické předzátížení $F_{stat.} = 2,4$ kN, což odpovídá asymetrii zatížení $R = 0,091$. Stanovený únavový přírůstek během tohoto kroku byl stanoven na 1,5 mm.

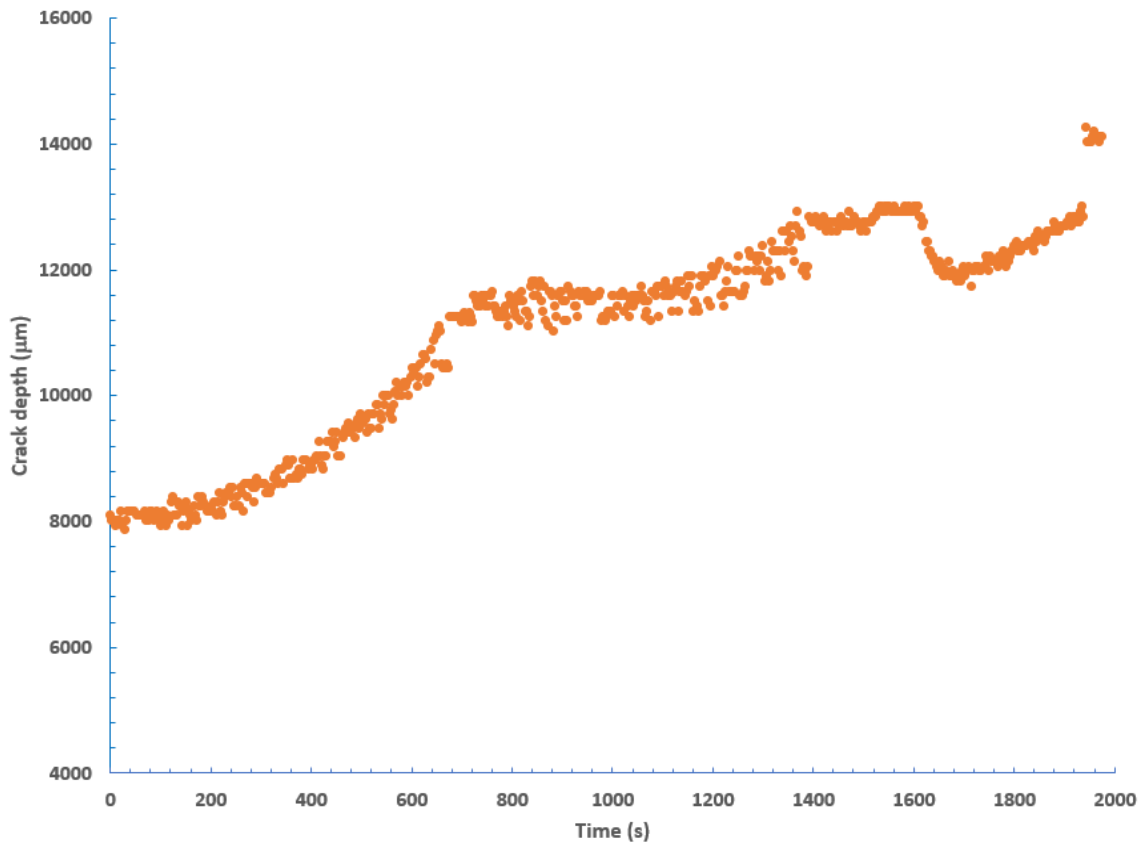


Obr. 5: Výkres zkušební vzorku použitého pro únavovou zkoušku



Obr. 6: Výkres zkušební vzorku použitého pro únavovou zkoušku

Růst trhliny byl sledován ACPD metodou právě pro identifikaci stanoveného únavového přírůstku. Na záznamu z měření (obr. 7) jsou patrné tři oblasti růstu trhliny. Zpočátku je růst rychlejší (vyšší zatěžovací síla). Po dosažení potřebné hloubky byla zatěžovací síla snížena, nějakou dobu je stabilní a později narůstá s menší rychlostí. Na konci cyklování byl vzorek statickou silou dolomen (poslední fáze záznamu). Zde je patrné zdánlivé snižování měřené hloubky trhliny (měřeného potenciálu) při zahájení statického zatížení. To je způsobeno rostoucím tlakem opěrných válečků na vzorek a ovlivněním budícího proudu přes trhlínu. Část proudu totiž neprochází přes trhlínu, ale je odváděna konstrukcí zkušebního stroje. Pro omezení tohoto vlivu bude v budoucnu zařízení osazeno ještě referenčním kanálem.



Obr. 7: Růst trhliny – sledováno ACPD metodou

Závěry

1. Bylo navrženo a vytvořeno zařízení pro příruční měření hloubky trhlín ACPD metodou.
2. Zařízení bylo ověřeno v praxi na modelových i reálných trhlínách.
3. Dále vznikl miniaturní měřicí modul pro kontinuální měření. Byl navržen sériový komunikační protokol a obslužný program pro Windows.
4. Měřicí modul byl úspěšně vyzkoušen při laboratorních únavových zkouškách.
5. V další variantě bude modul doplněn o kanál pro snímání referenčního potenciálu mimo trhlinu pro potlačení vlivu změn budícího proudu.