

# APLIKACE PŘENOSNÝCH DEFEKTOSKOPŮ PRO DIAGNOSTIKU V ENERGETICE

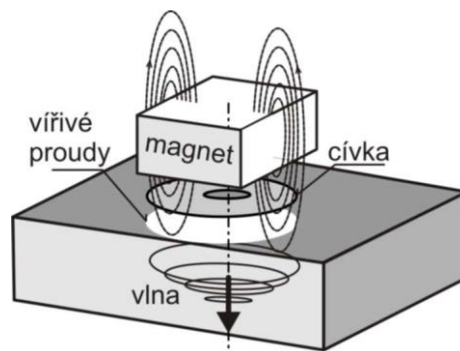
Stanislav Štarman

## Metoda bez akustické vazby mezi sondou a materiálem EMAT

V případech, kdy nelze použít kontaktní měření je nutné využít vhodné metody bezkontaktního testování struktury materiálů. Jednou z těchto metod, které také slouží pro detekci a lokalizaci podpovrchových vad, využívá elektromagnetická-akustická sonda EMAT. Oproti standardním bezkontaktním metodám metoda s EMAT sondou pracuje bez akustické vazby mezi sondou a materiálem. Jelikož pro vznik ultrazvukových vln musí z principu EMAT v testovaném prostředí protékat vířivé proudy, je EMAT ultrazvuková defektoskopie použitelná pouze pro elektricky vodivé materiály.

### Princip EMAT sondy

EMAT sonda se skládá z vodiče nebo plošné cívky (případně více cívek) a permanentního magnetu (případně více magnetů) umístěného nad testovaným objektem (obr. 1). V některých případech lze místo permanentního magnetu použít elektromagnet.



Obr. 1: Uspořádání EMAT sondy

Střídavý proud  $I$  procházející vhodně navrženou cívkou, která je orientována kolmo k povrchu vodivého materiálu, vyvolá střídavé magnetické pole, které je zastoupeno vektorem magnetické indukce  $\mathbf{B}$ . Střídavé magnetické pole indukuje ve vodivém materiálu vířivé proudy, které vytvářejí střídavý magnetický tok, který má opačný směr proti počátečnímu proudu protékajícímu cívkou. Hloubka vniku elektromagnetického pole daná frekvencí proudu a parametry materiálu musí být menší než vlnová délka  $\lambda$  ultrazvukové vlny. Výsledkem interakce vířivých proudů a stacionárního magnetického pole permanentního magnetu je tzv. Lorenzova síla  $\mathbf{F}$ . Tato síla způsobí deformaci vodivého materiálu, jejímž důsledkem je akustická vlna šířící se požadovaným směrem v testovaném materiálu. Ultrazvukové vlny [1], které se dále šíří materiálem, se odrážejí od struktury testovaného materiálu. Odražené ultrazvukové vlny způsobují změnu kmitání krystalické mřížky, což se projeví změnou velikosti detekovaného elektrického pole v EMAT sondě. Ultrazvukové vlny jsou tedy transformovány na elektrický ultrazvukový signál. Odražené ultrazvukové vlny jsou v sejmutém elektrickém signálu zastoupeny obálkou ultrazvukového signálu tzv. ultrazvukovými echy.

Vektor síly  $\mathbf{F}$  se snaží rotovat cívkou ve statickém magnetickém poli. Pokud jsou cívka a testovaný vzorek materiálu upevněny a změny pole se střídají v rozsahu frekvencí od několika stovek kHz do desítek MHz, dochází k posunu atomů v krystalické mřížce. V případě cívky použité v EMAT sondě, je možné uvažovat pouze první Maxwellovu rovnici ve tvaru

$$\oint \mathbf{B} dl = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}, \quad (1)$$

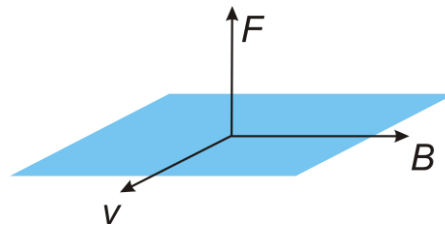
kde  $\mathbf{B}$  je vektor magnetické indukce,  $I$  je střídavý proud procházející cívkou,  $\mu_0$  je permeabilita,  $\epsilon_0$  je permitivita,  $\Phi$  je generovaný magnetický tok a  $t$  je čas. Lorentzovu sílu je možné vyjádřit vztahem:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (2)$$

kde  $q$  je elektrický náboj,  $\mathbf{v}$  je vektor rychlosti pohybujícího se náboje a  $\mathbf{E}$  je vektor intenzity elektrického pole. Pokud uvažujeme, že vektor elektrické intenzity  $\mathbf{E}$  má nulovou velikost, může být Lorentzova síla přepsána do tvaru:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (3)$$

Vektor Lorentzovy síly  $\mathbf{F}$  je kolmý k vektorům rychlosti  $\mathbf{v}$  a magnetické indukce  $\mathbf{B}$ . Orientace vektoru Lorentzovy síly  $\mathbf{F}$  je zobrazena na obr. 2. Orientace magnetického pole určuje typ generovaných ultrazvukových vln [2].

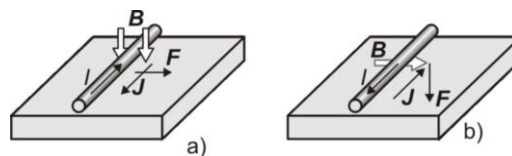


Obr. 2: Orientace vektoru Lorentzovy síly, magnetické indukce a rychlosti

Součin  $q \times \mathbf{v}$  udává vektor hustoty  $\mathbf{J}$  vířivých proudů v testovaném elektricky vodivém materiálu, takže platí pro Lorentzovu sílu

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}. \quad (4)$$

Vliv směru vektoru  $\mathbf{B}$  na směr síly  $\mathbf{F}$  je znázorněn na obr. 3.



Obr. 3: a) Generování příčné vlny, b) generování podélné vlny

Pokud je krystalická mřížka testovaného materiálu svázaná s proudem protékajícím cívkou ve směru magnetického pole jako elastického systému, zapříčiní vibrace mřížky vlastní oscilace na frekvenci, která je dána typem ultrazvukových vln generovaných v testovaném materiálu.

V testovaném vzorku o tloušťce  $d$ , kde se šíří ultrazvukové vlny s vlnovou délkou  $\lambda$  rychlostí  $c$  je rezonanční frekvence dána vztahem

$$f_{res} = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2d}. \quad (5)$$

Rychlost šíření ultrazvukových vln závisí na typu vlny, modulu elasticity  $G$  a hustotě materiálu  $\rho$

$$c = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (6)$$

Napětí  $\varepsilon$  vyvolané při pohybu krystalické mřížky je [1]

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + i\omega LB\xi(0, t), \quad (7)$$

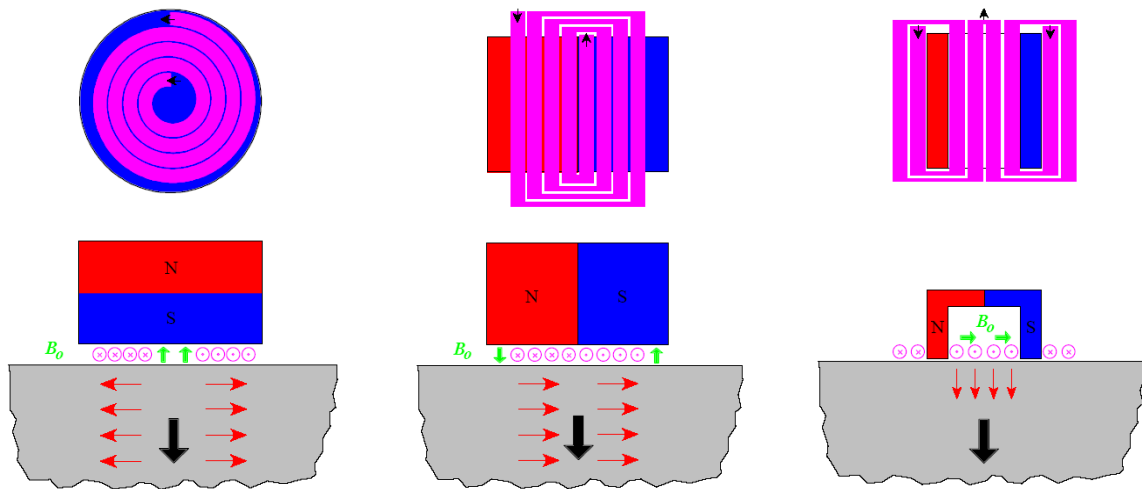
kde  $\varepsilon_0$  je počáteční napětí,  $\omega$  je úhlová rezonanční frekvence,  $L$  je konstanta,  $B$  je magnetické indukce a  $\xi$  je posun krystalické mřížky testovaného materiálu, který lze popsat vztahem

$$\xi(z, t)_{\infty} = e^{-j\omega t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(1 - \cos n\pi) \cos\left(\frac{\omega_n z}{S}\right)}{(\omega^2 - \omega_n^2 + i\omega\gamma)} \quad (8)$$

Rezonance nastává ve chvíli, kdy jmenovatel je roven nule a platí:

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_n \\ \omega_n &= n 2\pi f_{res} \end{aligned} \quad (9)$$

### EMAT sondy



#### EMAT konfigurace I

Spirálová cívka pro radiálně polarizované příčné vlny, které se šíří ve směru normály k povrchu.

#### EMAT konfigurace II

Čtvercová cívka pro lineárně polarizované příčné vlny šířící se ve směru normály k povrchu.

#### EMAT konfigurace III

Symetrická cívka pro podélné vlny šířící se ve směru normály k povrchu.

Obr. 4: Orientace vektoru Lorentzovy, magnetického pole a výsledné ultrazvukové vlny

## Zvýšení citlivosti metody EMAT s využitím zpracování signálu

Tab. 1: Přínos zvýšení odstupu signálu od šumu v dB

| Metoda /Af [mm]                      | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Průměrování 8×                       | 2,14  | 4,60  | 4,39  | 2,83  | 3,99  |
| Průměrování 256×                     | 3,92  | 14,24 | 14,19 | 11,08 | 13,61 |
| FIR                                  | 3,32  | 2,82  | 2,45  | 3,62  | 3,48  |
| WT                                   | 6,25  | 1,21  | 5,95  | 3,56  | 3,61  |
| Wienerova filtrace                   | 3,62  | 1,68  | 4,14  | 2,98  | 2,39  |
| Slepá separace (průměrování 8×)      | 12,06 | 5,36  | 8,24  | 6,32  | 7,64  |
| Slepá separace (průměrování 256×)    | 23,31 | 24,02 | 23,81 | 20,49 | 50,61 |
| Vzájemná korelace (průměrování 8×)   | 9,72  | 12,10 | 5,69  | 5,97  | 17,87 |
| Vzájemná korelace (průměrování 256×) | 24,49 | 12,27 | 30,90 | 9,18  | 84,26 |

V tab. 1 vidíme přínos zvýšení odstupu signálu od šumu v dB.

### Shrnutí pro metodu EMAT

Sondy EMAT mají své specifické vlastnosti, které limitují použití těchto sond v klasické defektoskopii, zvláště povrchová vodivost, která je závislá řadě faktorů, jako povrchová oxidace, povrchová koroze.

V žádném případě nelze říci, že klasická sonda o daném průměru a frekvenci bude mít podobné vlastnosti jako EMAT sonda.

Díky rozdílným principům charakteristiky sond jsou odlišné a lze sledovat jen jisté podobné rysy vycházející z fyzikálních principů.

Měření při více frekvencích, neboť sondu je možné prolakovat, je možné získat informaci o vertikálním profilu vodivosti a částečně závislost stabilizovat.

Při změně frekvence sondy mění vyzařovací diagramy.

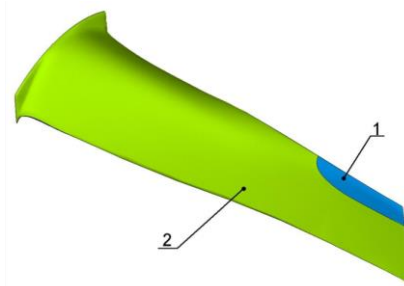
Metoda je vzhledem k možnosti generovat příčnou a podélnou vlnu vhodná pro měření mechanického napětí uvnitř materiálů a pro měření tloušťek bezkontaktní i přes barvu na povrchu a přes vrstvu tepelné izolace.

### Měření rozložení mechanického napětí lopatky turbíny metodou EMAT

Konvenční metody měření využívají podélné a příčné vlny generované klasickou ultrazvukovou sondou.

Při použití klasických sond generujících příčnou vlnu je třeba použít vhodný vazební prostředek, který připomíná lepidlo. Pro přesné měření je třeba měřit ve stejném místě.

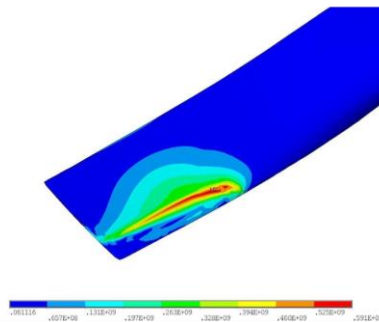
Oblast zakalení hrany lopatky je znázorněna na obr. 5. Při tepelném zpracování dojde k rozložení zbytkového napětí.



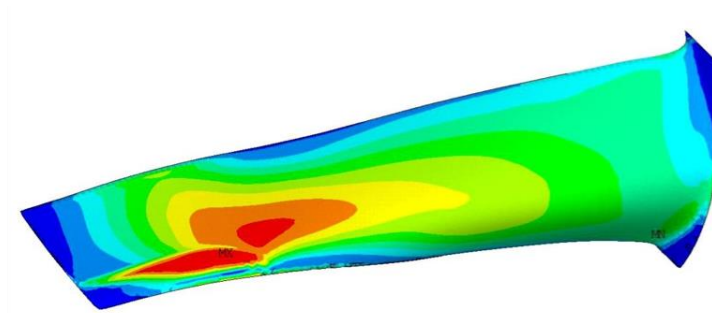
Obr. 5: Příklad oblasti zakalení hrany lopatky

Na obr. 6 až obr. 8 je zobrazen příklad rozložení zbytkového mechanického napětí lopatky turbíny.

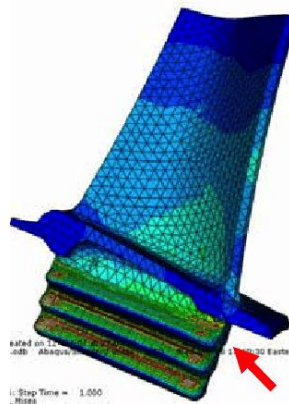
Pomocí metody EMAT je možné tato zbytková napětí měřit.



Obr. 6: Příklad zbytkového napětí hrany lopatky



Obr. 7: Příklad rozložení zbytkového napětí lopatky turbíny



Obr. 8: Příklad rozložení zbytkového napětí lopatky

Zde je výhoda metody EMAT, kde sondy dovedou generovat příčnou vlnu ne cirkulární ale orientovanou v podélném a příčném směru. Dvoukanálový defektoskop pak měří rozdíl šíření obou složek dle následující rovnice:

$$B=K(v_r - v_c). \quad (10)$$

kde B zbytkové napětí [MPa], K je konstanta podle typu oceli (např. 1 m/s = 43 MPa – závisí na třídě oceli),  $v_r$  je rychlost šíření v radiálním směru [m/s],  $v_c$  je rychlost šíření ve směru po obvodu [m/s].

V případě použití dvou zkřížených EMAT cívek, je možné měřit rozdíly rychlosti šíření bez otáčení sondy o 90° a zobrazovat přímo zbytkové napětí.

## Phased Array zajímavosti

### Měření hloubky zakalení

Moderní železniční nápravy využívají zakalení do hloubky, která je nastavena procesem vysokofrekvenčního ohřevu. Není však tak jednoduché bez rozříznutí a destruktivní kontroly provádět zkoušku nedestruktivně.

Na obr. 9 je viditelná tmavá část povrchu, která je zakalena po vyříznutí vzorku z nápravy.

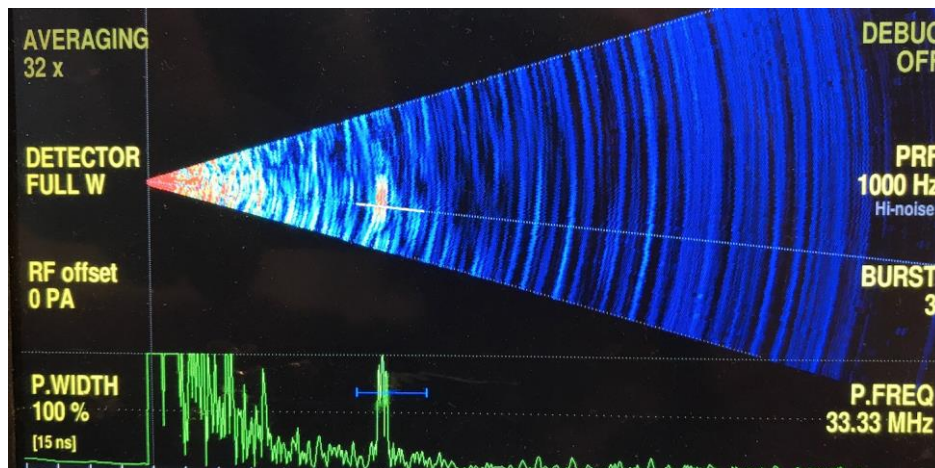


Obr. 9: Vzorek se zakalením podpovrchové vrstvy pro měření ultrazvukem

Protože jde o rozhraní mezi zakalenou a nezakalenou vrstvou, která navíc není rovnoběžná je nutno použít vysoké frekvence a miniaturní phased array sondy.

Při této zkoušce byla použita dávka pulsů 33 MHz, nižší frekvence nedávaly viditelný odraz od rozhraní.

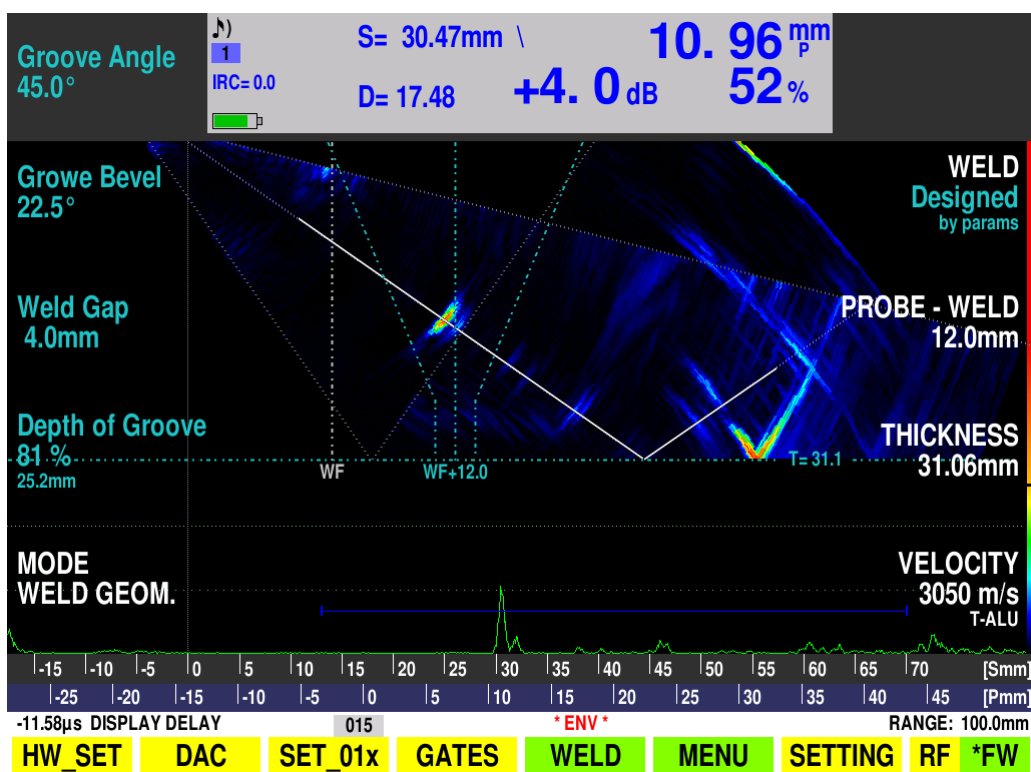
Na obr. 10 vidíme odraz od rozhraní, nejedná se o žádné vnitřní vady v materiálu nápravy. Při skenování podél nápravy není v celém průběhu tento odraz viditelný, tak praktické nasazení této metody žádá další výzkum.



Obr. 10: Odraz na rozhraní zakalení při frekvenci 33 MHz

## Měření s ONLINE manažerem svaru

Při měření svarů často nemáme k dispozici přesnou geometrii a výkresy jak svar vypadá. To způsobuje chyby zobrazení.



Obr. 11: ONLINE manažer svarů

ONLINE manažer umožňuje provádět korekce nastavení na reálném svaru. Když neznáme přesnou tloušťku a nejde ji změřit, vidíme stín odrazu od spodní plochy a můžeme dokorigovat nastavení profilu svaru dle skutečnosti. Všechny parametry je možné seřízovat pomocí tlačítek najednou v reálném čase.

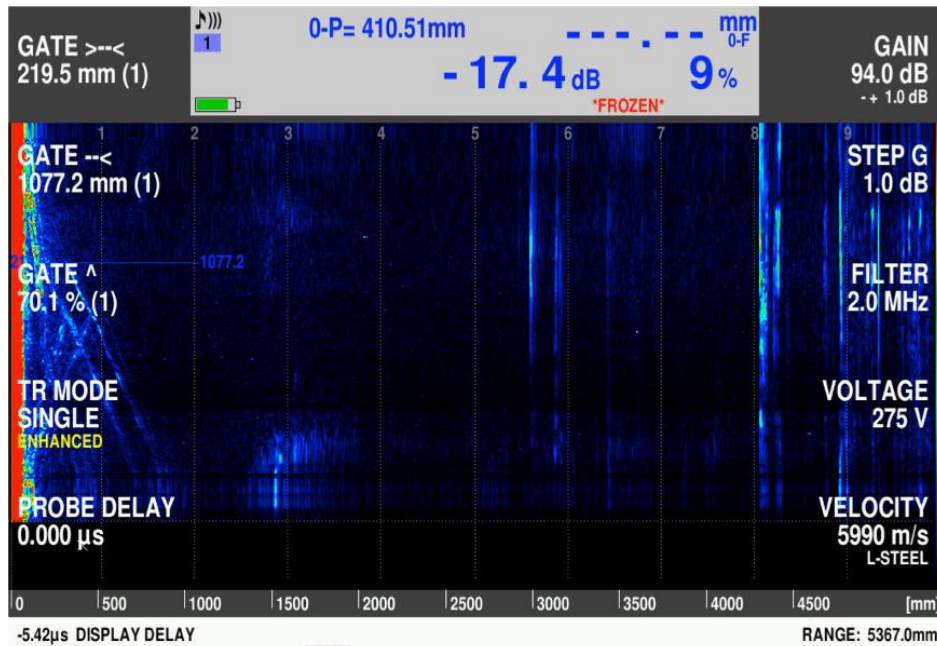
## Měření vnitřních vad výkovků a rotorů se sondou s dlouhým dosahem

Zkoušení dlouhých výkovků konvenčního ultrazvuku z hlediska citlivosti a délky časové základny je možné vylepšit s využitím pulser Dio1000, který při pseudokontinuálním vysílání vysílá užší paprsek sondy a pak umožní podrobnější sken než klasické impulsní přístroje. Nový typ sondy a buzení s velkým dosahem nám však umožní vidět i obraz z osy výkovků.

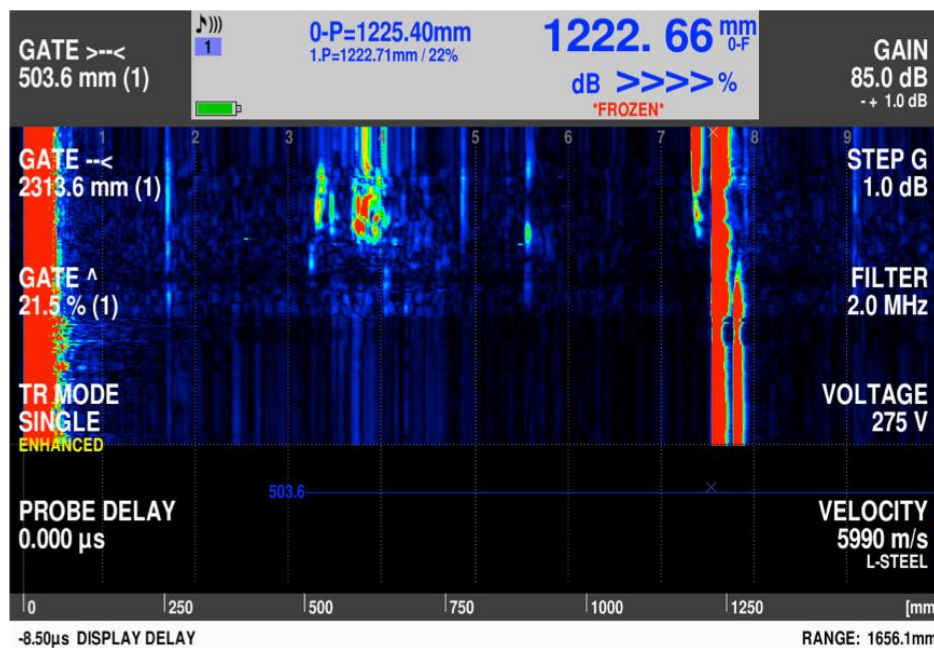


Obr. 12: Zkoušení výkovku axiálně

B-SCAN při podélném prozvučení nápravy nám dává obraz do hloubky 4500 mm. V hloubce 3000 mm a 4500 mm je koncové echo. Šířka skenu je 250 mm. Vada v hloubce 1500 mm je potvrzena bočním skenem na obr. 13 a obr. 14.



Obr. 13: B-SCAN při podélném měření výkovků



Obr. 14: B-SCAN radiální kontrolní pro vadu axiálně v hloubce 1500 mm

## Literatura

- [1] Hirao, M., Ogi, H. (2003): *Emats for science and industry, Noncontacting ultrasonic measurements*. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts (USA).
- [2] Dubé, N. (2007): *Advances in Phased Array ultrasonic technology applications*. Olympus NDT, Waltham, Massachusetts (USA).