



Možnosti kontroly celistvosti povrchov kovových materiálov konvenčnou ultrazvukovou technikou

Inspection possibilities of metallic material surface integrity by conventional ultrasonic technique

Koňár R., Mičian M., Fabian P.

Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra technologického inžinierstva E-mail: radoslav.konar@fstroj.uniza.sk

Článok je zameraný na možnosti ultrazvukovej kontroly povrchov kovových materiálov konvenčnou ultrazvukovou technikou. V teoretickej časti sú popísané fyzikálne princípy ultrazvuku, typy ultrazvukových vĺn použiteľných pre kontrolu povrchov a princípy kontroly. V experimentálnej časti sú uvedené tri techniky kontroly. Prvou technikou je kontrola bežnou uhlovou sondou s použitím priečnych vĺn. Druhou technikou je kontrola povrchu creepovými vlnami technikou 30-70-70 a treťou technikou je kontrola povrchovými - Rayleigho vlnami. Pre všetky tri techniky sú znázornené praktické príklady kontroly. Záver článku je venovaný výhodám a obmedzeniam jednotlivých metód kontroly.

ÚVOD

Ultrazvuková kontrola celistvosti povrchov je využívaná najmä z dôvodu rýchlej a spoľahlivej identifikácie defektov spojených s povrchom. Ide najmä o defekty typu trhlín, ktoré sú orientované kolmo k skúšanému povrchu. Touto metódou je možné odhaliť defekty s hĺbkou od 0,1 mm. Ultrazvuková kontrola povrchov je využívaná nielen ako výrobná, ale tiež ako prevádzková. Hlavnou výhodou je to, že ide o rýchlu nedeštruktívnu kontrolu, ktorá neovplyvní funkčnosť a prevádzkovú bezpečnosť skúšanej súčiastky alebo konštrukcie a je možné ju vykonať bez prerušenia prevádzky kontrolovaného dielu pokiaľ je prístupný jeho povrch.

Fyzikálny princíp ultrazvuku

Ultrazvuková kontrola využíva fakt, že v aspoň čiastočne elastických materiáloch sa môže šíriť zvuková vlna. Vlny vysielané do materiálu sa odrážajú od rozhraní rôznych akustických prostredí, teda i od vnútorných chýb a necelistvostí. Ultrazvukové vlnenie je definované ako mechanické kmitanie častíc okolo svojich rovnovážnych polôh v elasticky pružnom prostredí s frekvenciou nad 20 kHz. Pre praktické ultrazvukové skúšanie sa využívajú frekvencie od 0,5 MHz do 25 MHz. The article is focused on the possibilities of ultrasound surfaces control on metallic materials by conventional ultrasonic techniques. Physical principles, types of ultrasonic waves to be used for surface control are described in the theoretical part. Three surface control techniques are listed in the experimental part of article. The first technique is a common control by angle ultrasonic probe with using transverse waves. The second technique is surface control by 30-70-70 creep waves and third techniques is surface testing by Rayleigh waves. Practical examples of ultrasonic testing for all techniques are illustrated. The conclusion of the article is devoted to the advantages and limitations of the individual testing methods.

So zvyšujúcou sa frekvenciou sa znižuje vlnová dĺžka vlny a tým sa zvyšuje citlivosť kontroly. Vlnovú dĺžku mechanických kmitov možno vypočítať nasledovne:

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{1}$$

kde: λ – vlnová dĺžka [m], *c* – je rýchlosť šírenia ultrazvukovej vlny [m s⁻¹] a *f* – frekvencia vlnenia [Hz] [1-3].

Najmenší defekt, od ktorého nastane odraz ultrazvuku a tým aj jeho identifikácia musí byť minimálne rovný polovici vlnovej dĺžky. S narastajúcou frekvenciou však rastie útlm ultrazvukovej energie. Z toho dôvodu je vždy vhodné zvoliť pre konkrétny materiál správnu frekvenciu, tak aby sa zabezpečila dostatočná citlivosť a nízky útlm ultrazvukových vĺn [5,8].

Druhy ultrazvukových vĺn

V materiáli sa môže šíriť viacero druhov ultrazvukových vĺn. Rozdeliť ich možno na základe charakteru kmitania častíc okolo svojich rovnovážnych polôh v smere šírenia ultrazvukového zväzku. Pre kontrolu povrchov sú použiteľné tri druhy vĺn a to pozdĺžne, priečne a povrchové. Rýchlosť jednotlivých druhov vĺn závisí najmä od mechanicko-fyzikálnych vlastností skúšaného materiálu [1,5].

Pozdĺžne vlny

Pri tomto druhu vlnenia častice kmitajú rovnobežne so smerom šírenia ultrazvukovej vlny (Obr. 1). Šírenie vlny je charakteristické vznikom tlakových a ťahových napätí, a preto sa môže šíriť v pevnom, v kvapalnom aj v plynnom prostredí. Vlny sú vhodné na identifikáciu povrchových a objemových chýb [1].

Rýchlosť šírenia pozdĺžnych ultrazvukových vĺn sa označuje c_l a je možné ju vypočítať podľa vzorca:

$$c_L = \sqrt{\frac{E \cdot (1-\mu)}{\rho \cdot (1+\mu) \cdot (1-2\mu)}} \tag{2}$$

kde: c_L – rýchlosť šírenia pozdĺžnych ultrazvukových vĺn [m.s⁻¹], *E* – modul pružnosti v ťahu, resp. tlaku [Pa], ρ – objemová hmotnosť materiálu [kg m⁻³], μ – Poissonovo číslo kontrolovaného materiálu [2].



Obr. 1. Charakter kmitania častíc pozdĺžnej vlny c_L Fig. 1. The particle movement in the longitudinal wave c_L

Priečne vlny

Pri priečnych vlnách kmitajú častice kolmo na smer šírenia ultrazvuku (Obr. 2). V materiáli vplyvom kmitania vzniká šmykové napätie. Z tohto dôvodu sa priečne vlny môžu šíriť iba v pevnom prostredí a možno nimi zisťovať povrchové aj objemové chyby [1].

Rýchlosť šírenia priečnych ultrazvukových vln sa označuje c_T a možno ju vypočítať podľa vzťahu:

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho \cdot (1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$
(3)

kde: c_T – rýchlosť šírenia priečnych ultrazvukových vĺn [m s⁻¹], E – modul pružnosti v ťahu, resp. tlaku [Pa], G – modul pružnosti v šmyku [Pa], ρ – objemová hmotnosť materiálu [kg m⁻³], μ – Poissonovo číslo kontrolovaného materiálu [2].



Obr. 2. Charakter kmitania častíc priečnej vlny c_{τ} *Fig. 2. The particle movement in the transverse wave* c_{τ}

Povrchové Rayleighove vlny

Častice kmitajú po eliptickej dráhe v rovine kolmej na povrch kontrolovaného materiálu (Obr. 3). Môžu vznikať na voľnom povrchu pevného prostredia a šíriť sa do hĺbky približne jednej vlnovej dĺžky λ . Vlny sú vhodné na detekovanie iba povrchových chýb [1].

Rýchlosť šírenia povrchových ultrazvukových vĺn sa označuje c_R . Vzorec pre výpočet rýchlosti povrchových vĺn je:

$$c_{R} = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 - \mu} \cdot c_{T}$$
(4)

kde: c_R – rýchlosť šírenia povrchových ultrazvukových vĺn [m s⁻¹], c_T – rýchlosť šírenia priečnych ultrazvukových vĺn [m s⁻¹], μ – Poissonovo číslo kontrolovaného materiálu [2].

Rýchlosti pozdĺžnych, priečnych a povrchových vĺn pre vybraté kovové materiály sú uvedené v Tab. 1.



Obr. 3. Charakter kmitania častíc povrchovej vlny c_R Fig. 3. The particle movement in the surface wave c_R

EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Experimentálna časť článku sa zaoberá možnosťami praktického skúšania celistvosti povrchov materiálov tromi spôsobmi a to skúšaniu uhlovým zväzkom priečnou

Materiál	Merná objemová hmotnosť ρ [kg m ⁻³]	Poissonovo číslo <i>µ</i>	Rýchlosť šírenia pozdĺžnych vĺn c _L [m s ⁻¹]	Rýchlosť šírenia priečnych vĺn c _T [m s ⁻¹]	Rýchlosť šírenia povrchových vĺn c _R [m s ⁻¹]
hliník	2700	0,34	6320	3130	5932
meď	8900	0,35	4700	2260	4388
horčík	1730	0,30	5780	3050	5255
nikel	8800	0,31	5630	2960	5222
oceľ feritická	7850	0,28	5920	3250	5343
oceľ austenitická	8030	0,27	5200-5800	3000-3150	4818-5059

Tab. 1. Rýchlosť šírenia ultrazvukových vĺn pre vybraté materiály [4] / Ultrasonic wave propagation speed for chosen materials

Koroze a ochrana materiálu 61(3) 95-99 (2017)

DOI: 10.1515/kom-2017-0011



Obr. 4. Uhlové sondy pre skúšanie: priečnymi vlnami (vľavo), creepovými vlnami (v strede), povrchovými vlnami (vpravo) [3] Fig. 4. Angle beam probe for testing: with tranverse wave (left), creep wave (in the middle), surface wave (right)

vlnou, skúšaniu technikou 30-70-70 (CDS technika) a skúšaniu povrchovou-Rayleighovou vlnou. Pri týchto technikách sú použité druhy vĺn, ktorých charakter je popísaný vyššie. Všetky metódy sú založené na odrazovej ultrazvukovej metóde, kedy je sonda vysielačom zároveň aj prijímačom. Charakter a smer vlnenia je dosiahnutý použitím špeciálnych plexisklových klinov (Obr. 4).

Kontrola uhlovým zväzkom priečnou ultrazvukovou vlnou

Pre túto techniku skúšania sa používajú konvenčné uhlové sondy najčastejšie s uhlom lomu priečnej ultrazvukovej vlny v materiáli 45°, 60° a 70° a s frekvenciou meniča od 5 do 10 MHz. Uhol lomu závisí od hrúbky skúšanej časti. Pre materiály do 15 mm je najlepšie použiť uhol 70°, pre materiály od 15-25 mm je možné použiť 60° a pre materiály nad 25 mm používame uhol lomu 45°. Použitie rôznych uhlov je z dôvodu eliminácie mŕtveho pásma sondy. Najlepší odraz ultrazvukovej energie späť do sondy od necelistvosti orientovanej kolmo k skúšanému povrchu dostávame pri uhle 45°.

Základný princíp skúšky je zobrazený na Obr. 5. Táto metóda je schopná identifikovať povrchové chyby na priľahlom i protiľahlom povrchu súčiastky ak sú povrchy rovnobežné. V prípade zakrivených povrchov je kontrola chýb na priľahlom povrchu obmedzená vplyvom rozptylu od zakrivenia protiľahlého povrchu [1-3].

Postup kontroly je pomerene jednoduchý, kedy sa ultrazvukový systém v prvom kroku kalibruje pre daný materiál na mierkach pre kalibráciu uhlovej sondy. V ďalšom kroku sa nastaví do ultrazvukového prístroja



Obr. 5. Schéma kontroly uhlovým zväzkom: a) povrch bez chyby, b) povrch s chybou *Fig. 5. Angle beam testing scheme: a) surface without defect, b) surface with defect*



Obr. 6. A-sken z kontroly uhlovým zväzkom: a) bez chyby, b) s chybou Fig. 6. Angle beam testing A-scan: a) without defect, b) with defect

hrúbka skúšanej časti a nastaví sa citlivosť na vhodnej vzorke so známym defektom charakteru a veľkosti podobným ako očakávané chyby. Nastavenie citlivosti je založené na zmene zosilnenia tak, aby výška echa dosiahla určitú výšku na obrazovke defektoskopu. Výsledkom kontroly je A-sken (Obr. 6). V prípade povrchu bez defektov nie je na A-skene prítomné žiadne chybové echo. V prípade prítomného defektu sa chybové echo zobrazí na vzdialenosti prislúchajúcej hrúbke materiálu – protiľahlý povrch, prípadne na dvojnásobnej hrúbke – priľahlý povrch, ak je defekt indikovaný odrazeným lúčom. Kontrola sa vykoná posuvom sondy po celom povrchu v dvoch smeroch s natáčaním sondy o 90° [1-3].

Kontrola creepovými vlnami (30-70-70, CDS-technique)

Metóda kontroly povrchu 30-70-70 alebo inak nazývaná ako kontrola creepovými vlnami používa jednomeničovú sondu so špeciálnym predsádkovým klinom. Metóda je určená na identifikáciu trhlín spojených s protiľahlým povrchom. Táto technika používa pre indikáciu tri typy ultrazvukových vĺn.



Obr. 7. Schéma kontroly creepovými vlnami – technika 30-70-70 [3] *Fig. 7. Creep waves testing scheme – 30-70-70 technique*

Prvým typom vlny je povrchová vlna *šíriaca sa na* priľahlom povrchu, ktorá vytvára v materiáli nepriamy šmyk (červená na Obr. 7) a tým spôsobí šírenie priečnej vlny pod uhlom 31,5°. Priečna vlna sa po dopade na protiľahlý povrch transformuje na creepovú vlnu. Creepová vlna sa odrazí od akejkoľvek trhliny s minimálnou hĺbkou na opačnom povrchu skúšaného materiálu a ultrazvukový impulz sa vráti späť do sondy [1-3].

Druhým typom je priečna vlna s uhlom lomu 30° (žltá na Obr. 7). Táto vlna po dopade na opačný povrch súčiastky vygeneruje transformovanú 70° pozdĺžnu vlnu, ktorá sa po náraze na trhlinu odrazí späť do sondy. Touto vlnou je možné identifikovať stredne hlboké trhliny [7].

Tretím typom vlny je pozdĺžna vlna s uhlom lomu 70° (modrá na Obr. 7). Vlnou budeme schopní indikovať trhliny s pomerne veľkou hĺbkou priamym odrazom bez transformácie ultrazvukovej vlny [2,3].

V prípade chyby na protiľahlom povrchu materiálu, je možné na základe polohy a počtu ech na obrazovke defektoskopu približne určiť hĺbku chyby [4-6].

Kontrola povrchovými-Rayleigho vlnami

Pri tejto povrchovej kontrola sa generovaná povrchová ultrazvuková vlna šíri po povrchu skúšaného materiálu do hĺbky $\lambda/2$. Táto technika je citlivá na defekty akejkoľvek hĺbky, ktoré sú spojené s povrchom čím ho prerušujú. Identifikovať sa dajú iba chyby nachádzajúce sa na priľahlom povrchu k sonde. Pre generovanie povrchovej vlny sa používa špeciálny klin, v ktorom je menič naklonený v oblasti druhého kritického uhla. Princíp kontroly je znázornený na Obr. 8.

Výsledkom ultrazvukovej kontroly povrchovými vlnami je taktiež A-scan, na ktorom je v prípade povrchu bez defektu prítomné iba jedno echo od konca skúšanej časti. Ak je na povrchu prítomný defekt tak sa na A-skene zobrazí aj chybové echo, ktorého pozícia je pred koncovým echom (Obr. 9). Povrchová vlna sa môže šíriť aj po zakrivených povrchoch.



Obr. 8. Kontrola povrchovými-Rayleigho vlnami: a) povrch bez chyby, b) povrch s chybou *Fig. 8. Surface-Rayleigh waves testing: a) surface without defect, b) surface with defect*



Obr. 9. A-sken z kontroly povrchovými-Rayleigho vlnami: a) bez chyby, b) s chybou *Fig. 9. Surface-Rayleigh testing A-scan: a) without defect, b) with defect*

DISKUSIA

Na základe teoretických a praktických poznatkov môžeme popísať výhody a nevýhody jednotlivých metód nasledovne. Metóda kontroly ultrazvukovým uhlovým zväzkom priečnymi vlnami je veľmi rýchla kontrola, ktorou je možné presne lokalizovať identifikovaný defekt nachádzajúci sa na oboch povrchoch skúšanej súčasti. Výhodou je použitie bežne dostupných sond s uhlom lomu ultrazvuku v materiáli 45°,60°a 70°. Nevýhodu je možnosť kontroly materiálov s hrúbkou minimálne 8 mm ako aj strata citlivosti na chyby nachádzajúce sa na priľahlej strane pri kontrole na zakrivených povrchoch vplyvom rozptylu ultrazvukovej energie.

Kontrola creepovými vlnami je veľmi citlivá technika aj na malé defekty umiestnené na protiľahlom povrchu voči sonde. Vysoká spoľahlivosť je zabezpečená tromi typmi šíriacich sa ultrazvukových vĺn. Nevýhodou je použitie špeciálnych jednoúčelových sond, prístupnosť protiľahlého rovnobežného povrchu ako aj to, že nie je možná presná lokalizácia chyby na povrchu materiálu z dôvodu rozdielnej rýchlosti šírenia jednotlivých vĺn.

Kontrola povrchovými vlnami je taktiež veľmi citlivou technikou s možnosťou presnej lokalizácie polohy defektu na povrchu. Výhodou je možnosť kontroly aj tenkých materiálov, ako aj to, že pre kontrolu postačuje iba prístupnosť skúšaného povrchu. Nevýhodu je opäť použitie špeciálnych plexisklových klinov.

Nevýhodou všetkých techník kontroly celistvosti povrchu je tiež potreba kovovej čistoty povrchu a jeho nízka drsnosť (do 12,5 Ra).

ZÁVER

Ultrazvukovákontrolajejednouznajkomplexnejších nedeštruktívnych techník, ktorá veľmi flexibilne umožňuje prispôsobiť skúšobný systém skúšanej časti. Kontrola celistvosti povrchov ultrazvukom je rýchlou kontrolou, ktorá dokáže identifikovať defekty pevne spojené s povrchom. Nachádza uplatnenie nielen ako výrobná, ale i prevádzková a to hlavne pri dynamicky namáhaných strojných súčastiach.

Poďakovanie

Príspevok vznikol v rámci riešenia projektu KEGA-034ŽU-4/2015, ktorý je financovaný Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej Republiky.

LITERATÚRA

- Chen, C. H. Ultrasonic and advanced methods for nondestructive testing and material characterization, 1st ed.; World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.: London, 2007.
- Kundu, T. Ultrasonic methods for material and structure inspection, 1st ed.; ISTE Ltd: London, 2007.
- Panametrics Ultrasonic Transducers., 2016. www.olympus. com. https://www.olympus-ims.com/data/File/panametrics/ panametrics-UT.en.pdf (accessed June 06, 2016).
- Langenberg, K. J. Ultrasonic nondestructive testing of materials, 1st ed.; CRC Press: Boca Raton, 2012.
- Mráz, M. Nedestruktivní zkoušení trubek pomocí metody LFET, UT a ET. Koroze a ochrana materiálu 2015, 59 (3), 77–80.
- Brezinová, J.; et al. Influence of the hardfacing welds structure on their wear resistance. *Metals* 2016, 6 (2), 1–12.
- Broncek, J.; et al. Influence of mechanical anisotropy in low carbon microalloyed steel. *Communications: Scientific Letters of the University of Zilina*, 2015, 17 (3), 25–30.
- Mesko, J.; et al. Microstructure analysis of welded joints after laser welding. *Manufacturing technology: Journal for Science, Research and Production*, **2014**, *14* (3), 355–359.