

METHODOLOGY FOR INSPECTION OF RIVETED SAMPLES BY THE ECA METHOD

METODIKA KONTROLY NITOVANÝCH VZORIEK METÓDOU ECA

Michal Janovec

Air Transport department
University of Žilina
Univerzitná 8251/1
010 26, Žilina
michal.janovec@fpedas.uniza.sk

Jozef Čerňan

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26, Žilina
jozef.cernan@fpedas.uniza.sk

Abstract

The eddy current method is very often used technique of non-destructive testing and evaluation of materials. The method is very suitable for the detection of cracks that result from fatigue or cracking as a result of stress corrosion. Eddy current testing can be performed with minimal part preparation and a high degree of sensitivity. The eddy current method is used for the detection of surface and subsurface failures, corrosion in aircraft structures, holes for fixing various components and thread cracks. The paper describes the application of the eddy current method ECA in the inspection of riveted joints of the produced sample. The riveted sample is made of aluminum sheets and countersunk head rivets. Simulated damages are created around the rivet holes on the riveted specimen. Artificially formed notches simulate cracks around the rivet holes, and aluminum powder is used to simulate corrosion of aluminum sheets. These damages are then scanned with an Olympus OmniScan MX flaw defectoscope and the results of the measurements are evaluated in this article. SAB-067-005-032 and SBB-051-150-032 are used for non-destructive measurements.

Keywords

eddy current, riveted sample, defectoscope, cracks, corrosion

1. Úvod

Prediktívna údržba sa čoraz viac stáva významnejšou súčasťou každodenných operácií a procesov v mnohých odvetviach priemyslu. Tento trend sa ukázal ako veľmi sľubná rastová príležitosť pre globálny trh služieb nedeštruktívneho testovania (NDT) a nasmeroval ho na cestu vysokého rastu (Bugaj, Pecho & Janovec, 2017). Cieľom oblasti nedeštruktívneho testovania je rozšírenie a skvalitnenie metodológií nedeštruktívneho testovania, aby sa spoločnostiam vykonávaným údržbu, opravy a generálne opravy (MRO) zefektívnilo vykonávanie prehliadok lietadiel, znížili sa prestoje a znížili sa náklady (Bugaj & Rostáš, 2016).

Nedeštruktívne testovanie (NDT) je široká skupina techník hodnotenia, ktoré sa používajú v priemysle s cieľom analyzovať vlastnosti systému, komponentu alebo materiálu bez toho, aby došlo k jeho poškodeniu. Keďže nedeštruktívne testovanie nemení funkčnosť komponentu, patrí medzi hodnotnú technológiu zisťovania jeho vlastností, šetrí čas a náklady potrebné na vykonanie kontroly. Základné metódy NDT zahŕňajú známe metódy ako napr. vizuálne, vírivé prúdy, rádiografické, kapilárne, magnetické práškové, termografické a ultrazvukové (Škeřík, 2014).

Metóda vírivých prúdov je veľmi často používanou technikou nedeštruktívneho testovania a hodnotenia materiálov. Metóda je veľmi vhodná na detekciu trhlin, ktoré vznikajú únavou materiálu alebo praskaním ako dôsledok napätovej korózie (Bugaj, 2012). Kontrola metódou vírivých prúdov sa môže vykonať s minimálnou prípravou dielov a vysokým stupňom citlivosti.

Pri metóde vírivých prúdov je skúšaný objekt vystavený pôsobeniu striedavého magnetického poľa, ktoré je vytvorené budiacou cievkou, napájanou striedavým prúdom. Skúšaný objekt určitých rozmerov musí byť elektricky vodivý, teda mať magnetickú permeabilitu. V skúšanom objekte sa indukujú vírivé prúdy, ktoré pôsobia svojím magnetickým účinkom na magnetické pole pôvodné, teda budiace. Tieto dve magnetické polia (primárne od budiacej cievky a reakčné od vírivých prúdov) sa vektorovo skladajú vo výsledné pole, ktoré je závislé na elektrickej vodivosti a magnetickej permeabilite skúšaného objektu (Janoušek, 2016).

Princíp hodnotenia materiálov pomocou vírivých prúdov je ten, že štruktúrny stav materiálu zmení uvedené magnetické a elektrické parametre. V prípade výskytu chyby v materiáli, dôjde k prerušeniu časti dráh vírivých prúdov, kedy dôjde k zmene spätného účinku na budiace pole.

Metóda vírivých prúdov sa používa na detekciu povrchových a podpovrchových chýb, koróziu v lietadlových konštrukciách, otvorov na upevnenie rôznych súčiastok a trhlín na závitoch.

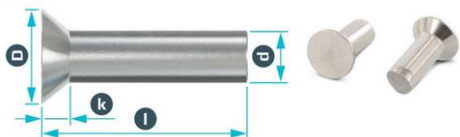
2. Technika vírivých prúdov ECA

Na kontrolu zhotovených nitovaných spojov bola využitá technológia vírivých prúdov ECA (Eddy Current Array). ECA je metódou, ktorá umožňuje elektronické ovládanie cievok vírivých prúdov umiestnených vedľa seba v jednej zostave sondy. Zber údajov z jednotlivých cievok sa uskutočňuje multiplexovaním cievok v špeciálnom vzore, aby sa zabránilo vzájomnej indukčnosti medzi jednotlivými cievkami (Janovec & Bugaj, 2017). Metóda ECA poskytuje nesporné výhody kontroly jediným prechodom nad kontrolovaným objektom a lepším zobrazovacím schopnostiam. Metóda ECA poskytuje výrazné úspory času kontroly nitovaných spojov ako napríklad pri použití

bodových sond. Metóda ECA využíva rovnaké základné princípy ako konvenčná technológia vírivých prúdov (Lamarre, 2019). Striedavý prúd prechádzajúci cievkou vytvára magnetické pole. Keď je cievka umiestnená nad vodivou časťou, vytvárajú sa protiahlé striedavé prúdy (vírivé prúdy). V prípade poruchy dôjde k prerušeniu dráhy vírivých prúdov a zmena vírivých prúdov je zaznamenávaná meracou cievkou. V prípade sond ECA, každá jednotlivá cievka v sonde vytvára signál vzhľadom na fázu a amplitúdu štruktúry pod ňou. Tieto údaje sa vzťahujú na zakódovanú polohu a čas a sú graficky znázornené ako obraz C-scan (pohľad z hora). Zobrazenie C-scan umožňuje rýchlu orientáciu na skúšanej ploche a dobrú interpretáciu výsledných dát. Každá samostatná cievka vírivého prúdu v sonde produkuje signál vzhľadom na fázu a amplitúdu štruktúry pod ňou. Tieto dáta sa vzťahujú na zakódovanú pozíciu a čas a graficky sa reprezentujú ako obraz C-scan (Lüthi, 2013). Pri aplikáciách nitu cievky vírivého prúdu, ktoré prechádzajú cez poškodený nit, vytvárajú jedinečnú odozvu signálu. Pre cievky, ktoré sú ovplyvnené trhlinou, ktorá sa začína z otvoru nitu, je na displeji C-scan zobrazená zmena amplitúdy. Pre cievky, ktoré nezaznamenajú žiadnu zmenu, zostane zobrazenie farieb na displeji C-scan stále konštantné.

3. Popis vytvorených nitovaných vzoriek a diagnostického prístroja použitého na merania

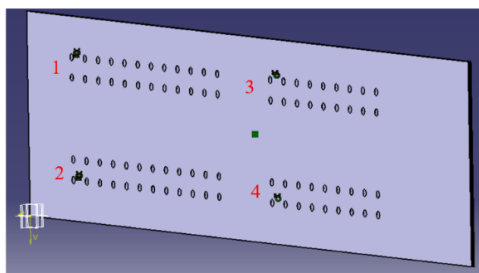
Pre kontrolné merania bolo vytvorených niekoľko typov nitovaných spojov, na ktorých sa simulovali vytypované poškodenia. Nitované spoje boli vyhotovené z hliníkových neeloxovaných plechov rozmerov 200 x 1000 x 1mm. Ako spojovacie prvky boli použité hliníkové plné rozklepávacie nity so zapustenou hlavou STN 02 2311 rozmeru 4x6 mm (obrázok 1).



Obrázok 1: Nit so zapustenou hlavou použitý pri nitovacej vzorke. Zdroj: Autori.



Obrázok 2: Vytvorené nitované spoje (pohľad z hora). Zdroj: Autori.

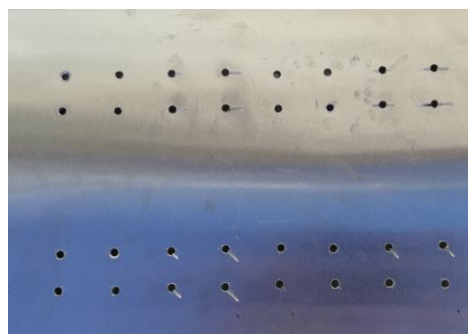


Obrázok 3: Model nitovanej vzorky vytvorený v programe Catia V5. Zdroj: Autori.

Nitované spoje na kontrolné merania boli vytvorené preplátovaním troch hliníkových plechov, z ktorých každý mal

hrúbku 1 mm. Výsledná hrúbka nitovanej vzorky bola teda 3 mm. Otvory pre nity boli vytvorené stĺpovou vrtačkou. Na vytvorenie otvorov bol použitý vrták s priemerom 4 mm. V plechu, kde dosadali zapustenia hláv nitov do otvorov, bolo potrebné záhlbníkom vytvoriť skosenie diery pre správne zapadnutie hlavičky nitu do plechu. Nitované spoje boli vytvorené ručne, pomocou pneumatického nitovacieho kladiva, v štyroch dvojradových oblastiach, ktoré sú naznačené na obrázku 3, pod položkami 1,2,3,4.

Na nitovanej vzorke boli vytvorené umelé výrezy, ktoré simulovali poruchy nitovaných spojov. Tie boli na nitovaných plechoch vytvorené vybrúsením zárezov v oblasti otvorov pre nity. Dĺžka simulovaných porúch bola 2,4,6 a 8 mm a šírka 1 mm. Hĺbka vybrúsených zárezov sa pohybovala od 0,5 do 1 mm. Hĺbky zárezov v jednotlivých plechoch sa nedajú presne určiť, pretože zárezy boli vytvárané ručne, elektrickou ručnou mikro vrtačkou (obrázok 4). Poruchy boli orientované pozdĺž otvorov pre nity, prípadne sklonené pod uhlom 45°.



Obrázok 4: Vytvorené umelé poškodenia v oblasti otvorov pre nity. Zdroj: Autori.

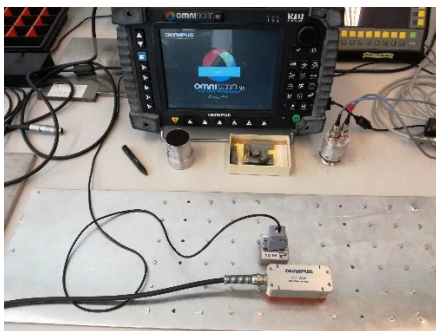
V oblasti nitovaných spojov boli simulované aj poruchy spôsobené povrchovou koróziou hliníkového plechu. Na povrch plechu bol nalepený hliníkový prášok, simulujúci rôzne tvary korózie medzi nitovanými plechmi. Na simuláciu korózie bol použitý veľmi jemný hliníkový prášok CAS:7429-90-5. Hliníkový prášok bol na povrch plechu nalepený flexibilným lepidlom s gélovou konzistenciou na báze FLEXTEC polyméru bez obsahu rozpúšťadiel.



Obrázok 5: Hliníkový prášok nalepený na povrch plechu. Zdroj: Autori.

Na merania nitovaných spojov bol použitý prístroj Olympus OmniScan MX. Tento prístroj patrí medzi modulárne a prenosné testovacie jednotky. V prístroji bol použitý modul pre meranie vírivými prúdmi. Prístroj je možné využiť na manuálne, ale aj automatizované kontroly. Počet kanálov prístroja je 32 s vnútornou multiplexáciou, prípadne 64 kanálov s externou multiplikáciou. Konektor OmniScan má funkciu ID sondy, ktorá umožňuje fyzickú detekciu a rozpoznanie sondy pripojenej

sondy. Táto funkcia má za úlohu nastavenie rozlíšenia C-scan ECA sond a načítanie správnych parametrov sondy.



Obrázok 6: Merací prístroj Olympus OmniScan MX s meracími sondami použitými pri experimentálnych meraniach. Zdroj: Autori.

K meraciemu prístroju boli použité príslušné sondy Olympus ECA s označením SBB-051-150-032 a SAB-067-005-032, ktoré sú vhodné na takúto kontrolu nitovaných spojov (Olympus, 2010).

4. Vyhodnotenie meraní simulovaných porúch a korózie

Pred vykonaním jednotlivých meraní je potrebné najskôr dané sondy kalibrovať na známej materiálovej vzorke s umelými poruchami. Materiálová vzorka s umelými poruchami obsahuje kalibračné poruchy, ktorých rozmery (dĺžka, hĺbka) sú známe. Kalibračné sondy by sa mala vykonať na čo možno najidentickejších skúšobných vzorkách. Mali by byť z rovnakého materiálu (alebo materiálu s rovnakou vodivosťou) a hrúbky ako časti, ktoré sa majú skúšať, a ak sa má testovať viacvrstvá čať, každá vrstva by mala byť z rovnakého materiálu (alebo rovnakej vodivosti) a hrúbky ako skúšobné časti. Okrem toho by mali mať reálne alebo umelé chyby simulujúce požadovaný typ, polohu a orientáciu, ako chyby ktoré sa musia odhaliť.

Pred meraním je potrebné zistiť referenčné signály sondy, ktoré sa budú porovnávať so skutočnými nameranými signálmi, v ktorých sa môžu vyskytnúť trhliny, prípadne korózia. Kalibračný proces je potrebné vykonať pred každým meraním. Metóda ECA je tzv. komparatívna metóda. To znamená, že sa musia porovnávať dva signály: bez akéhokoľvek poškodenia (bez trhlín alebo chýb) a signál s vopred známymi poruchami, ktorých parametre poznáme. Diferenciál týchto dvoch signálov dáva rozdielnú odozvu, ktorá je dôležitá na analýzu signálov a ich vyhodnotenie. Na základe porovnania týchto signálov je možné uviesť a potvrdiť záver o akomkoľvek meraní. Všetky kalibračné merania sa vykonali na kalibračných vzorkách. Pod pojmom kalibračné vzorky sa rozumie bloková vzorka z rovnakého materiálu ako je skutočná štruktúra s prítomnosťou trhliny definovaných rozmerov. Výsledné signály sú po excitácii zobrazené a sú základnými signálmi na vyhodnotenie ďalších neznámych signálov získaných meraním skutočnej štruktúry.

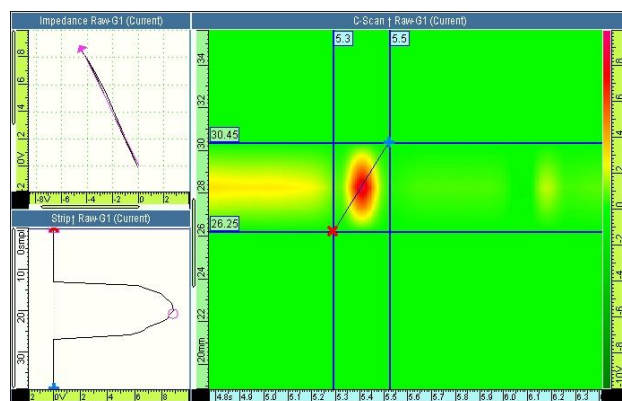
Ako prvé meranie bolo uskutočnené meranie otvoru pre nit, ktorý ešte nebol vyplnený nitom. Toto prvotné meranie bolo potrebné uskutočniť pre zlepšenie kalibrácie, nastavenia meracieho prístroja a meracích sond. Meranie taktiež poskytlo detailnejšie informácie o štruktúre nitovanej vzorky, ktorá bude následne kontrolovaná na ostatné simulované poruchy. Výsledok merania otvoru pre nit je zobrazený na obrázku 8. Najkomplexnejší pohľad na kontrolovanú štruktúru poskytuje mód C-scan. C-scan zobrazuje výsledky merania v

dvojrozmernom zobrazení ako rovinný pohľad na kontrolovanú štruktúru. Tento pohľad je podobný zobrazeniu ako pri röntgenovom obraze. Farebné spektrum zobrazené pri C-scan predstavuje priebeh amplitúdy. Zobrazené jednotlivé farby predstavujú hĺbku signálov porúch pri prechode sondy po skúšanom povrchu.

Ďalším zobrazením, ktoré poskytuje defektoskop je zobrazenie impedančnej roviny (impedance raw). Toto zobrazenie znázorňuje priebeh impedancie zaznamenananej počas merania.

Posledným zobrazením je zobrazenie grafu priebehu impedancie (strip raw) v čase. Toto zobrazenie sa nachádza pod zobrazením impedančnej roviny.

Určenie rozmerov poruchy je možné odhadnúť zo zobrazenia C-scan, v ktorom je možné použiť kurzory na odčítanie rozmerov poruchy. Výsledný rozmer priemeru otvoru pre nit odčítaný z kurzorov na zobrazení C-scan predstavuje: 30,45 mm – 26,25 mm = 4,2 mm. Hodnota priemeru otvoru pre nit odčítaná z kurzorov na zobrazení C-scan, zodpovedá skutočnému otvoru pre nit, ktorého veľkosť bola 4 mm. Ďalší parameter, ktorý je možný zistiť z obrazovky defektoskopu je hĺbka poruchy, v tomto prípade dĺžka otvoru pre nit. Hĺbka porúch sa určuje z priebehu signálu impedancie v čase (graf strip raw). Meranie bolo uskutočnené na hliníkovom plechu hrúbky 1 mm. Maximálna hodnota impedancie odpovedala približne 9V. V nasledujúcich meraniach bude táto známa hodnota impedancie používaná na odhad hĺbky simulovaných porúch, teda ako porovnávací hodnota impedancie.



Obrázok 7: Určenie rozmeru otvoru pre nit. Zdroj: Autori.

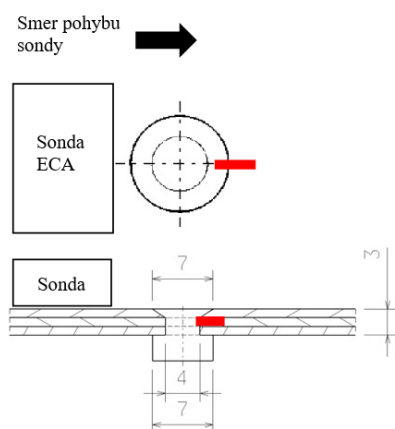
4.1. Simulová porucha v druhej vrstve nitovanej vzorky

Nasledujúce ukážka z merania je zameraná na kontrolu v druhej vrstve nitovanej vzorky. Dĺžka vytvorených porúch v otvore pre nit bola 6 a 8 mm. Na kontrolu bola použitá sonda SBB-051-150-032. Pre vhodné výsledky kontroly druhej vrstvy nitovanej vzorky sa použili nasledovné nastavenia sondy vírivých prúdov:

- budiaca frekvencia 120 kHz,
- zisk 60 dB,
- použitý highpass filter (vysokopriepustný filter).

Pri vykazovaní veľkých odchýlok permeability vzniká veľký šum na pozadí zobrazenia C-scan. Zlepšenie zobrazenia a zníženie šumu na pozadí zobrazenia C-scan sa dá dosiahnuť použitím vysokopriepustného filtra. Vysokopriepustný filter by sa mal používať len vtedy, keď sa zisťujú malé poruchy materiálu. Tento

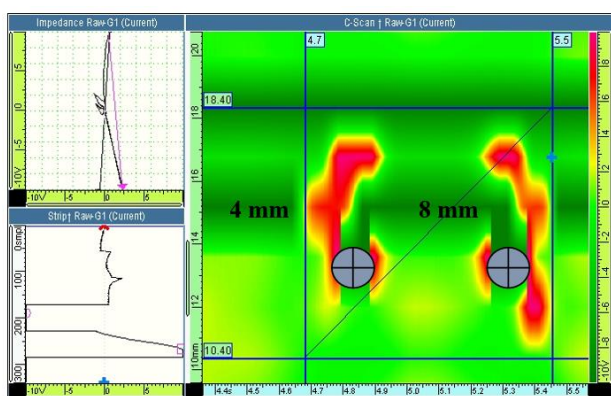
filter nie je vhodné používať pri zisťovaní korózie väčších rozmerov. Filtre s vysokým priepustom majú tiež tendenciu eliminovať pozdĺžne poruchy (paralelne s pohybom skenovania) a zvyšujú kolmé alebo uhlové poruchy. Preto treba pri použití vysokopriepustných filtrov postupovať s rozvahou.



Obrázok 8: Spôsob kontroly nitovaného spoja s vytvorenou poruchou v druhom plechu nitovanej vzorky. Zdroj: Autori.

Výsledok skenovania je zobrazený na obrázku 9. V ľavej časti zobrazenia C-scan je výsledok skenovania poruchy dĺžky 4 mm. Odčítaná dĺžka zobrazenej poruchy z kurzorov zobrazenia C-scan zodpovedá skutočnej dĺžke simulovanej poruchy. V tom istom obrázku na pravej strane C-scan zobrazenia je znázornená porucha dĺžky 8 mm, taktiež zhotovená v druhej vrstve nitovanej vzorky. Odčítaná dĺžka poruchy z obrazovky defektoskopu je približne 7 mm.

Hodnoty impedancií sa pri skenovaní pohybovali v rozmedzí -10 V po $+10$ V. Na základe priebehu signálu impedancie je možné určiť hĺbku poruchy zobrazenú defektoskopom približne na 1 až 1,5 mm.



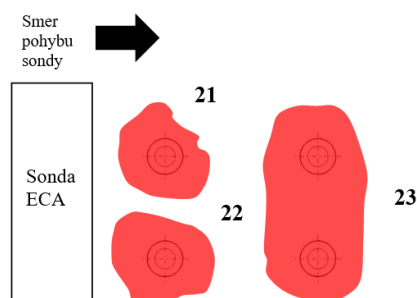
Obrázok 9: Výsledok kontroly simulovanej poruchy dĺžky 4 mm a 8 mm v druhom plechu nitovanej vzorky. Zdroj: Autori.

4.2. Simulovaná korózia v druhej vrstve nitovanej vzorky

Pre simuláciu korózie medzi nitovanými plechmi bol použitý hliníkový prášok, popísaný v predchádzajúcej časti článku. Nasledujúca kontrola bola zameraná na odhalenie takto simulovanej korózie. Skenovanie bolo zamerané na odhalenie prítomnosti hliníkového prášku v druhej vrstve nitovanej vzorky. Tvar nalepeného hliníkového prášku v okolí nitov je zobrazený na obrázku 10.

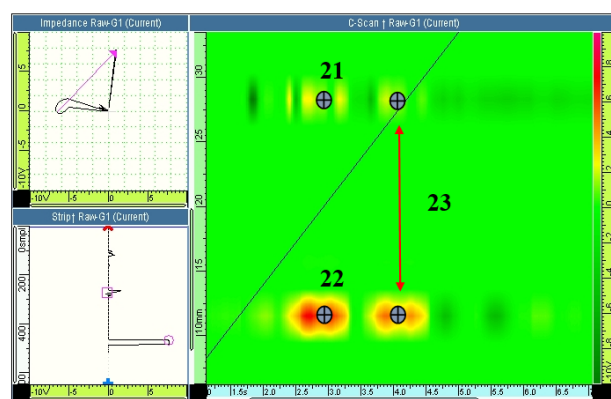


Obrázok 10: Hliníkový prášok skenovaný v druhej vrstve nitovanej vzorky (fotografia pred znitovaním plechov). Zdroj: Autori.



Obrázok 11: Spôsob kontroly nitovaného spoja so simulovanou koróziou v druhej vrstve nitovanej vzorky. Zdroj: Autori.

Výsledok kontroly je zobrazený na obrázku 12. Na skenovanie bola použitá sonda SAB-067-005-032, ktorá je vhodnejšia pre zisťovanie prítomnosti korózie. Najlepšie výsledky sa získali pri nastavení budiacej frekvencie 10 kHz, zisku 75 dB, bez použitia filtra. Pri skenovaní bola simulovaná korózia pomocou hliníkového prášku odhalená s veľmi dobrým rozlíšením. Maximálna hodnota signálu impedancie zodpovedá približne $+9$ V a odhadovaná hĺbka porúch na základe tejto hodnoty impedancie je 1 mm.



Obrázok 12: Výsledok kontroly simulovanej korózie v druhej vrstve nitovanej vzorky. Zdroj: Autori.

Hliníkový prášok bol však zachytený len v oblasti nitov. V priestore medzi nitmi hliníkový prášok sondou zachytený nebol (oblasť naznačená červenými šípkami). Takýto výsledok môže byť spôsobený tým, že plechy medzi nitmi k sebe nedoliehajú a je medzi nimi vzduchová medzera. V tejto oblasti nedochádza k zmene vírivých prúdov a hliníkový prášok nie je odhalený.

5. Záver

V súčasnom priemysle majú techniky deštruktívnej a nedeštruktívnej kontroly svoje nezastupiteľné miesto pre zabezpečenie kvality výrobkov. Zatiaľ čo deštruktívne techniky sa využívajú len pri niektorých vzorkách výrobkov, pretože po vykonanej skúške sú tieto výrobky zničené. V moderných priemyselných procesoch sú však nedeštruktívne techniky podstatne výhodnejšie, pretože všetky testovania sú vykonávané bez trvalých zmien skúšaného objektu.

Základy tejto nedeštruktívnej techniky boli položené už pred niekoľkými desaťročiami, výskum a vývoj nových sond, techník a prístrojového vybavenia je neustále vykonávaný výrobcami a výskumnými skupinami po celom svete. Na splnenie čoraz vyšších štandardov kvality, ktoré sa vyžadujú v takmer každom priemysle, sú vyvíjané nové sondy a skúma sa použitie nových supravodivých kvantovo-interferenčných prístrojov. Neustály vývoj sond je taktiež zameraný na optimalizáciu detekcie trhlin a prevádzkových premenných, ako sú frekvencia a pomer signálu k rušeniu vírivých prúdov.

Pre veľký počet simulovaných porúch na nitovanej vzorke v článku nie sú podrobne vyhodnotené výsledky všetkých meraní. Kontrolované však boli všetky simulované poruchy vyhotovené na nitovanej vzorke. Parametre nastavenia meracieho prístroja boli pre ostatné poruchy v prvej, druhej a tretej vrstve nitovanej vzorky totožné ako pri vyhodnotených meraniach uvedených v článku. Pri meraniach boli všetky simulované poruchy nitovanej vzorky spoľahlivo odhalené. Menšie nepresnosti pri meraniach boli zaznamenané v treťom plechu nitovanej vzorky. V tomto prípade sa meracia sonda dostala na hranicu hĺbky prieniku vírivých prúdov.

Na záver je možné zhrnúť, že nedeštruktívne testovania na báze vírivých prúdov poskytujú priemyslu spoľahlivé informácie o výskyte rôznych nežiadúcich anomálií materiálov a súčiastok. S vývojom nových materiálov používaných aj v leteckej technike prebieha neustály vývoj nových techník na spoľahlivú kontrolu týchto materiálov. V priebehu posledných rokov boli dosiahnuté vynikajúce zlepšenia tejto nedeštruktívnej techniky a možno vysloviť, že zlepšovanie bude naďalej pokračovať.

Referencie

- Bugaj, M. 2012. Basic step of applying reliability centered maintenance in general aviation. *Transport Problems*, Volume 7, p. 77-86.
- Bugaj, M., Pecho, P., & Janovec, M. 2018. Maintenance reliability monitoring system. In *Zvyšovanie bezpečnosti a kvality v civilnom letectve*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita, 2018. ISBN 978-80-554-1418-8. s. 52-55.
- Bugaj, M., Rostáš, J. 2016. Diagnostika lietadlovej techniky. In: *Zvyšovanie bezpečnosti a kvality v civilnom letectve 2016: medzinárodná vedecká konferencia organizovaná v rámci riešenia projektu Základný výskum tarifnej politiky na špecifickom trhu letiskových služieb VEGA 1/0838/13*: Zuberec, 27.-29. január 2016. Žilina: Žilinská univerzita. 2016. ISBN 978-80-554-1143-9. s. 64-66.

- Janoušek, L., et al. 2016. Diagnosis of real cracks from eddy current testing signals using parallel computation. In: *Nondestructive Testing and Evaluation*, published online 17 Oct 2016, ISSN 1058-9759, 9 p.
- Janovec, M., Bugaj, M. 2017. Nedeštruktívne metódy kontroly konštrukcie lietadiel. In *Aero-Journal: international scientific journal of air transport industry*. 2017. ISSN 1338-8215. č. 1, s. 32-37.
- Janovec, M., Smetana, M., Bugaj, M. 2019. Eddy Current Array Inspection of Zlin 142 Fuselage Riveted Joints. *Transportation Research Procedia* 40, pages 279–286. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.042>
- Lamarre, A. 2019. Eddy current array technology for the inspection of aircraft and engine during maintenance. Dostupné na Internete (cit. 10.12.2018): <https://ndt.aero/images/docs/Eddy%20current%20array.pdf>
- Lüthi, T. 2013. Non-Destructive Evaluation Methods, Dostupné na Internete: <https://www.pdfdrive.com/non-destructive-evaluation-methods-d38650200.html>
- Olympus. 2010. Eddy Current Probes and Accessories. Dostupné na Internete (cit. 23.01.2019): <http://www.epsilon-ndt.com/upload/file/eddy-current-problari.pdf>
- Škeřík, M., Mařánek, P. 2014. *Skripta NDT metódy*. Praha: Advanced Technology Group.