

НЕДЕСТРУКТИВНО ТЕСТИРАЊЕ НА МАТЕРИЈАЛИ СО ПОМОШ НА ВРТЛОЖНИ СТРУИ



Д-р Влатко Чингоски
Сектор за развој и инвестиции,
Електростопанство на Македонија

Во овој труд сакаме да направиме еден соопштен осврт на употребите, методите, начинот и резултатите кои се добиваат од неdestructивното испитување на немагнетните материјали со помош на вртложни струи. Ке покажеме дека овој метод е високо ефективен, брз и сигурен во голем број на практични случаи каде другите методи не можат ефикасно или пак воопшто не можат да се употребат. Ке се запознаеме со физичките основи на овој метод, неговите можности за апликација, видови на проби како и нивните предности и недостатоци. На крај ќе дадеме и неколку насоки во смисол на подобрување на квалитетот на резултатите како и можни правци за развој и истражувања во оваа област.

Тестирањето на материјалите со помош на вртложни струи (eddy-current testing - ECT), е една од најпознатите методи за неdestructивна анализа на материјалите по однос на постоењето на дефекти, пукнатини или деформации, без разлика дали се тие во внатрешноста на материјалот или пак површински распространети [1]. Овој метод наоѓа голема примена особено за in-service инспекција на цевките на генераторите на пареа (парегенератори) во нуклеарните центри со реактор со пареа под притисок (PWR - pressurized water reactor), потоа на изменувачите на топлина и кондензаторите кај конвенционалните и модерните нуклеарни центри и термоцентрали, гасно-комбинирани термоцентрали, рафинериите или другите хемиски инсталации.

Заеднички именител кај сите нив е потребата за постојана и засилена сигурносна контрола на сите цевни инсталации заради постигнување на сигурност и стабилност на целокупниот работен процес. Многу важен параметар е и потребата за следење и најавување на било каква аномалија при работењето на постројката, анализа на нивото на опасност на проблемот, негово следење и по можност отстранување без запирање на работниот процес. Овој метод овозможува анализа на материјалите без демонтажа на испитаниот дел, ниту пак со превземање на било каква деградација на самиот материјал што е од исклучително значење како заради непрекинатооста на самиот тех-

нолошки процес, така и заради големите трошоци кои еден такъв предвиден или непредвиден застој би имал од финансиска гледна точка. Со оглед на фактот што кај овој метод не постои никаков директен контакт меѓу испитуваниот примерок и пробата (сензорот), најпрво, секаков хавариски случај е предвремено исклучен, и како второ и многу значајно, целокупниот процес на тестирање може да биде потполно автоматизиран.

Заради сите горенаведени предности кои овој метод ги нуди на своите корисници, широк спектар на најразлични видови на проби се појавиле и секојдневно се појавуваат. Покрај наједноставниот вид на проба или сензор, сензорот "палачинка" (pan-sake probe), па преку Чекко-проба (Checco probe), plus-point проба, fluxset проба, итн., различни видови на сензори секојдневно се воведуваат во употреба со најразличен успех. Поради тоа, развивањето на се понови видови на сензори е императив со цел да се подобри квалитетот на тестирањата [2 - 4].

Методите за неdestructивно тестирање во литературата може да се сретнат и под името методи за неdestructивна евалуација (НДЕ), бидејќи тие овозможуваат не само да се пронајде местоположбата на дефектот, туку и во исто време да се направи квалитативна и квантитативна анализа и евалуација на големината, значењето и опасноста што тој дефект ја има врз деградацијата на материјалот како и самиот произведен про-

цес. Ова својство на НДЕ уште повеќе допринесува за нејзина широка распространетост како евалуационен метод.

Овој труд е организиран на следниот начин: најпрво ќе направиме краток преглед на постоечките методи за анализа на квалитетот на материјалите, а понатака ќе се запознаеме со физичките особини и начинот на работа на сензорите кои работат врз принципот на генерирање на вртложните струи. Ќе се запознаеме со неколку типични видови сензори кои масовно се користат за неструктивна анализа, за потоа подетално да се запознаеме со еден современ вид на сензор кој во моментов дава еден од најдобрите резултати при тестирањата. Ќе научиме како се читаат добиените сигнали, како се истите анализираат заедно со сите нивни предности и ограничувања. На крај ќе дадеме резиме на целокупниот труд со смерници за понатамошни можности за испитување и истржување во доменот на неструктивното тестирање на материјалите.

Принципи на работа на сензорите базирани на вртложни струи

Како што и самото име кажува, пробите кои работат врз база на вртложните струи се всушност во исто време генератори и приемници на магнетно поле. Едноставно кажано, овие проби се состојат од намотка која е извор на променливо магнетно поле и која се вика возбудна намотка и индукциона намотка во која треба да се индуцира сигналот кој треба да се анализира. Појавата на електричен сигнал е директен резултат од взаемното дејство помеѓу електромагнетното поле генерирано од возбудната намотка и електромагнетното поле генерирано од вртложните струи кои ќе протечат низ испитуваниот материјал како реакција на постоењето на возбудното магнетно поле. Наједноставни се

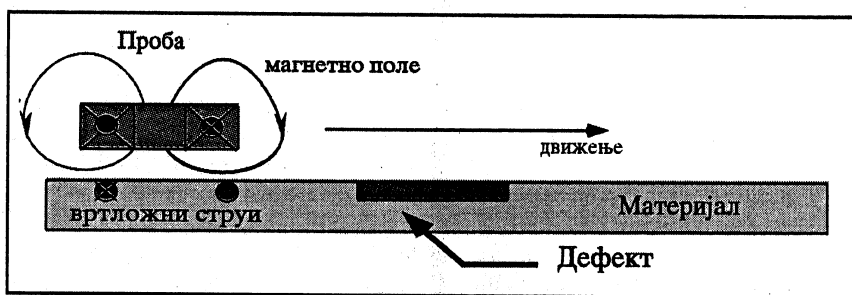
пробите кои имаат само една намотка што во исто време е и возбудна намотка и индукциона намотка. Овој тип на проба кој поради својата форма го носи името "палачинка" (rap-sake probe) има голема примена во некои поедноставни случаи или пак како модел резултат за споредба на резултатите со нови и посовремени типови на сензори т.е. проби.

На Сл. 1 прикажана е општа шема по која се врши неструктивно испитување на материјали со помош на вртложни струи. Пробата или сензорот се движи рамномерно над испитуваниот материјал. Низ него протекува струја која создава наизменично магнетно поле кое поради појавувањето на вртложните струи внатре во материјалот е

ва опасност за понатамошната работа, дали е единечен или повеќеброен и сл. Сигналот кој се добива од сензорот се води директно на екран или пак во некој експерски изработен систем кој најчесто работи на база на неуромрежи или логички контролери кои можат веднаш да дадат одговор на сите непознаници во однос на карактеристиките на дефектот.

Од сето ова може да се заклучи следното:

1. Материјалот што се испитува мора да биде проведен за да може низ него да протечат вртложните струи.
2. Дебелината на испитуваниот предмет мора да биде конечна за да се постигнат добри резултати (овде зборуваме за цевки кои секогаш имаат конечна дебелина).



Слика 1: Недеструктивна анализа со помош на вртложни струи.

несиметрична по оската на движење. Но, и покрај тоа сигналот на излезот од сензорот ќе биде непроменет се додека имаме рамномерна површина под сензорот без никакви дефекти. Во оној момент кога ќе се појави дефект во материјалот, распределбата на вртложните струи ќе се промени, а како резултатот на тоа ќе се промени и полето, а со тоа и интензитетот и формата на сигналот кој ќе се добие. Врз основа на промената на интензитетот и формата на сигналот, може да се констатира за каков дефект станува збор, неговата местоположба, дали е тој од иста страна со сензорот во внатрешноста на материјалот или пак на спротивната страна од сензорот во однос на испитуваниот материјал, колку е долг, широк па дури и колку е длабок дефектот, дали претставу-

Од дебелината на материјалот во голема мерка ќе зависи и фреквенцијата на возбудната струја која се користи во сензорот.

3. Испитувањето може да се остварува многу брзо и лесно да се автоматизира. Обично брзината на движење на сензорот е неколку десетици центиметри во секунда.

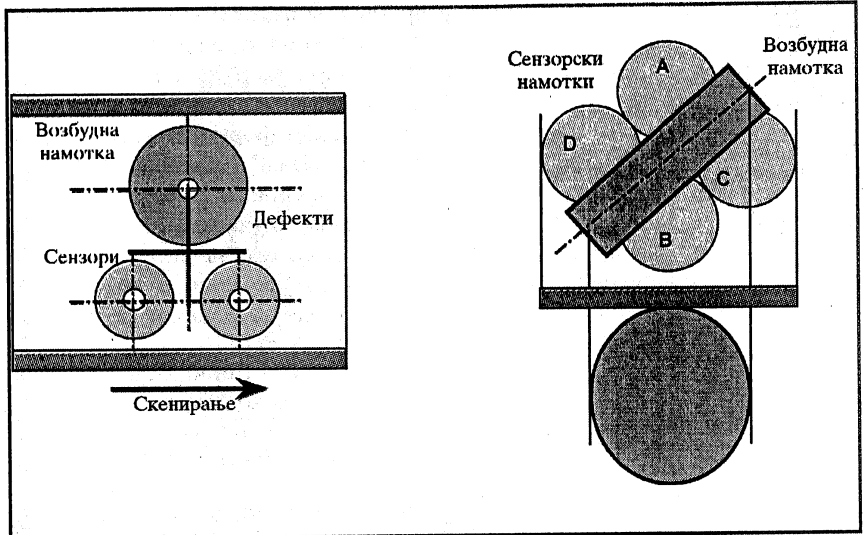
4. Растојанието меѓу сензорот и испитуваниот материјал треба да биде константно, за да се избегне појавување на нерегуларни сигнали кои наместо да бидат резултат на постоењето на дефект, најчесто ќе бидат резултат на бучавата на сигналот (noise). Многу е важно да се намали бучавата на сигналот и да се зголеми односот сигнал/бучава за да се добијат што поточни резултати при мерењата.

Може да заклучиме дека користењето на една и иста намотка како возбуда и како индукциона (една намотка како извор на поле и сензор), не е оптимално и има големи проблеми во случај на евалуација на дефекти со многу мали димензии или пак детекција на мултидефекти, односно повеќе дефекти на многу мал простор. Тоа е и основната причина зошто денеска рап-саке пробите не се користат во голема мерка. Тие имаат едукативна намена и постепено се заменуваат со многу посовремени и поточни сензори за кои ќе кажеме нешто во продолжение на овој труд.

3. Неколку типови на проби

Со развојот на нуклеарната технологија и паралелно со тоа и погребата за што поточна и повидурна работа на истите, се појавуваат на различни видови на проби за неdestructивна анализа [3, 4]. Секоја од нив се карактеризира со определени предности и недостатоци како во однос на поточноста на анализите така и во однос на примената на тестирањето и нејзината применливост за детекција на различни видови на дефекти. Меѓу најраспространетите видови на проби се т.н. Чесо проба (Chesco probe), Round-robin проба, Four-coils проба, проба со ротирачко поле, магнетен fluxset проба, итн. На Сл. 2 прикажани се шематски Чесо пробата и four-coils пробата заради добивање на сознание кај нашите читатели за фактичкиот начин на работа на овие електромагнетни уреди.

Основни карактеристики кои ја дефинираат успешноста со која една проба може да дијагностицира постоење на дефект како и да ги дефинира параметрите на тој дефект се пред се робусноста и универзалноста на нејзината употреба. Многу важен момент е јачината на сигналот кој се добива како резултат на скенирањето, како и влијанието на видот на материјалот врз до-



а) Сессо проба

б) Four-coils проба

Слика 2: Два типа на неdestructивни проби базирани на врлжосни струи.

биениот резултат, неговата форма (плоча или цевка), постоење на потпорен (магнетен материјал кој ја зголемува значително буката на сигналот (noise)), односот сигнал/бука како и влијанието на растојанието меѓу пробата и испитуваниот материјал (lift-off) и отстапувањето од паралелата меѓу материјалот и пробата (de-tiltation). Сите овие параметри мора да се земат во предвид за да може со голема сигурност да се дефинираат карактеристиките на дефектот.

За да можат да се утврдат квалитетите на разни видови проби кои речиси секојдневно се појавуваат на пазарот на неdestructивна анализа, утврдени се заеднички критериуми т.н. benchmark или споредбени проблеми. Предноста на ваквиот начин на работа се состои во фактот што било кој во светот работи со еден ист проблем и се обидува најпрво нумерички, а потоа и експериментално да го тестира својот сензор, докажувајќи дека неговата примена е поцелесходна во однос на веќе постоечките сензори или пак дека неговата примена е поширока од досегашните.

2.1 Benchmark Проблеми

Општо прифатени во до-

менот на неdestructивната анализа со помош на врлжосни струи се следните шест видови на benchmark проблеми [2], [4]:

1. Рамна плоча без дефекти

Се испитува проведен материјал без дефекти. Дефинирани се големината на плочата, големината на сензорот, видот на материјалот и фреквенција на тестирање. Воглавно, овој тест се изведува за рап-саке проба. Овој тест најчесто се користи за тестирање на точноста на нумеричкиот код кој се користи при анализите.

2. Рамна плоча со дефект

Се следи промената на импеданцијата на сигналот како резултат на постоење на дефект на површината на испитуваниот материјал. Се третира ист материјал како и во погорниот случај и се анализираат неколку видови на дефекти направени со помош на ЕДМ (electric discharge machine).

3. Модел на вистинска цевка од парагенератор со дефект

Се испитува модел на вистинска цевка на парагенератор од нуклеарен реактор. Се анализира 1/4 од цевката со неколку дефекти со различни димензии. Поради постоење на криволиниска повр-

шина (curvature) добиени сигнали за дефекти во овој тест треба да се поголеми по амплитуда од оние добиени за дефект со исти димензии како во тестот под 2.

4. Рамна плоча со надворешен дефект

Се анализира сигнал со помош на панкаце проба поставена во центарот на три испитувани примероци. Големината на примероците како и формата на дефектот е иста како и во другите тестови, само што овде се работи за подлабоки дефекти од горенаведените.

5. Депозити и потпорни плочи

Се анализираат модели кои се многу блиски до вистинската ситуација при анализите во природната положба на цевките - постоење на депозитни материјали на надворешноста на цевката, или уште почесто постоење на потпорни плочи или делови од плочи кои служат како механичка потпора на цевките во вистинските центри. Овие материјали најчесто генерираат бука во сигналот (noise) и допринесуваат за потешко дефинирање на параметрите на дефектот. Овие депозити или потпорни материјали се најчесто изработени од бакар или пак од магнетен материјал.

6. Дефекти со различна форма

Се разгледуваат неколку видови на дефекти со различна форма, за да може да се оцени реагирањето на различни типови на сензори на различни видови на дефекти. Најчесто се разгледуваат следните форми на дефекти: а) елиптички, б) трапезоиден, в) скалест, и обичен г) правоаголен дефект. Се мери амплитудата, фазната разлика и формата на сигналот за да може да се дефинираат некои групи на сигнали кои дефинираат форма на анализираниот дефект.

2.2. Нумеричка анализа

Како што веќе напоменавме, за да се проверат карак-

теристиките на секој нов вид на сензор, најпрво се вршат редица на тестирања користејќи ги горенаведени шест benchmark проблемите. За нумеричка анализа на електромагнетното поле, а подоцна и на вртложните струи кои се генерираат внатре во проводниот материјал и поради чие присуство во намотките на сензорот се индуцираат напони кои ние ги нарекуваме сигнали и чија амплитуда и фазна разлика ја следиме, можат да се користат поголем број на нумерички техники [5], [6]. Со оглед на фактот што станува збор за извонредно тешка геометрија (циркуларни цевки со многу мали димензии, а особено дебелина на цевката, високи фреквенции, мала пенетрација на врложните струи, итн.), видот на методите кои можат да се користат со навистина задоволувачка прецизност на добиените резултати, е прилично редуциран. Најчесто се користат методата на конечни елементи и тоа со повеќе подвидови со неколку бази величини како непознати (А - φ, Б - E, или Г метода со јазлови или рабни конечни елементи), како и хибриден FEM - BEM, значи метод на конечни елементи заедно со метод на гранични елементи. Без разлика кој нумерички метод ќе се користи или кој вид на величини ќе бидат избрани за непознати, определување на сигналот се одвива по иста законитост. Најпрво се врши испитување на моделот без присуство на дефект и се определува индуцираниот напон во сензорската/ките намотки:

$$V_0 = -j \omega N_s \int_L A_c d\ell$$

каде V_0 е индуцираниот напон во бездефектна состојба, N_s е бројот

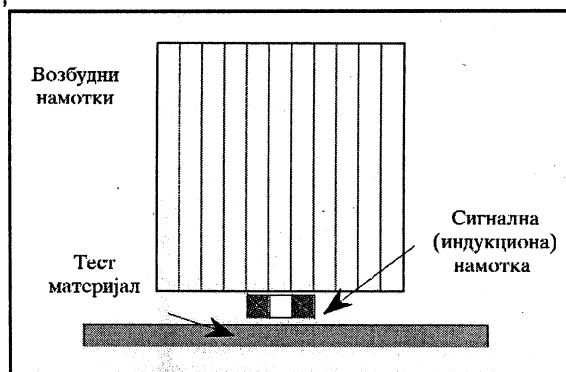
на навивки на сензорската намотка, A_c го претставува магнетниот вектор потенцијал, но само оној дел кој е резултат на врложните струи, а интегрирањето се врши по целата должина на сензорската намотка L . Со делење на овој индуциран напон со струјата која поминува низ намотката може да се добие и вредноста на импедансата на намотката [6].

Истата постапка се повторува и во случај на постоење на дефект, при што се добива некоја друга вредност за индуцираниот напон V_0 . Со пресметување на разликата меѓу двата добиени сигнали може да се дефинира типот на дефектот и неговите карактеристики.

Во продолжение на овој труд, ќе се задржиме конкретно на еден вид на проба, т.н. проба со ротирачко поле која е една од најефикасните видови на проби базирани на вртоложни струи.

Проба со ротирачко поле (rotating field eddy-current probe)

Една од најмодерните проби кои работат на принципот на вртложни струи за неструк-



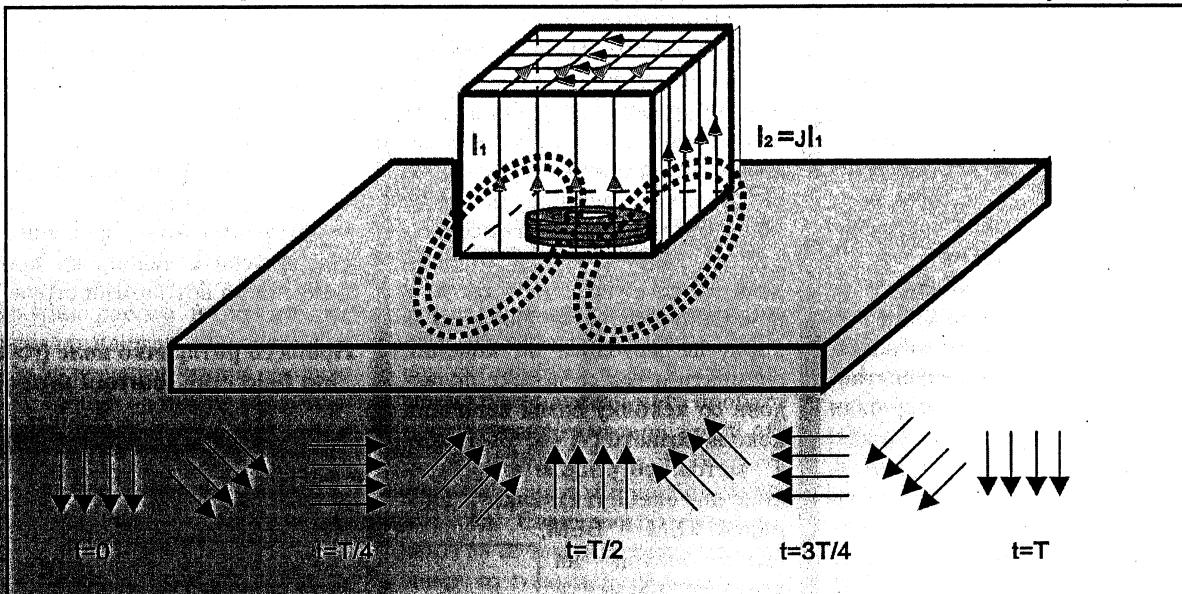
Слика 3: Шематски приказ на проба со ротирачко поле.

тивно тестирање на материјалите е т.н. проба со вртложно поле [7], [8]. Шематски приказ на овој тип на проба или сензор, е прикажан на Сл. 3. Овој вид на проба се состои од две намотки кои се просторно изместени за 90° . Овие две намотки формираат квадратна

возбудна намотка како што е прикажано на сликата. На долната страна од возбудната намотка се наоѓа индукционата намотка или намотката во која се генерира сигналот кој потоа се води на засилувач и на соодветен дисплеј систем или друг уред за негово запишување и/или континуирано следење. Растојанието меѓу сензорската намотка и испитуваниот материјал има големо значење за квалитетот и точноста на мерењата, се вика lift-off и треба да се

намотка поминува возбудна струја со ист интензитет, но временски изместена за агол од $\pi/2$. Тоа значи дека ваква комбинација на намотките ќе резултира со појава на вртливо магнетно поле насочено према површината на материјалот што се испитува. Ова поле генерира протекување на вртложни струи низ проводниот материјал што се испитува. Насоката на вртложните струи се менува, односно исто така е ротирачка, но со константна амплиту-

Анализата на сигналите може да се врши паралелно со испитувањето или пак подоцна ако се користат уреди за запис на добиениот сигнал. Заради забрзување на детекцијата на дефектот како и негова точна квалификација и селекција во групата на сериозни дефекти или несериозни дефекти, најчесто се користат логички системи (fuzzy - logic systems) или системи базирани на претходно знаење (knowledge based detection systems). Овие



Слика 4. Индуцирани вртложни струи од страна на пробата со ротирачко поле.

опрежува константно за време на целото мерење. Пробата се движи по должината на целиот испитуван материјал и се се следи сигналот како резултат на промената на индуцираниот напон во сензорската намотка, што е директен резултат на промената на просторната распределба и јачината на индуцираното магнетно поле како резултат на протекувањето на вртложните струи низ испитуваниот материјал.

Накратко ќе се осврнеме на принципот на работа на оваа проба. Веќе рековме дека нејзината возбудна намотка се состои од две намотки кои се меѓусебно просторно изместени за агол од 90° . Во исто време, низ секоја

да. Ова е важно од две причини:

1. овозможува полесна детекција на сите видови дефекти без разлика на нивната големина и позиција; внатрешен дефект (**ID - inner defect**) или надворешен дефект (**OD - outer defect**), и

2. сигналот добиен од сигналната намотка не зависи од насоката на дефектот во однос на намотката. Кај останатите проби ако насоката на скенирање не се совпаѓа со насоката на дефектот многу слаби сигнали се добиваат кои се најчесто од ред на големина на буката на сигналот и можат да доведат до подценување на значењето на дефектот, односно негово непотребно занемарување.

системи најчесто се составени од неуро мрежи, генетски алгоритми, вештачка интелигенција или едноставно се базирани на принцип на "правило - принцип" што во голема мерка го олеснува процесот на детекција или истиот го прави минимално зависен од субјективноста на операторот на испитувачкиот уред. Овој труд излегува од склопот на анализата на ваквите софистицирани уреди за анализа на сигналите и затоа тие нема да бидат разгледувани овде. Во овој труд, ние се задржуваме само на првиот и основен дел од недеструктивната анализа, а тоа е генерирање на точен и доволно јак сигнал кој може да даде доволно информации за дефектот.

4. Анализа на добиените сигнали

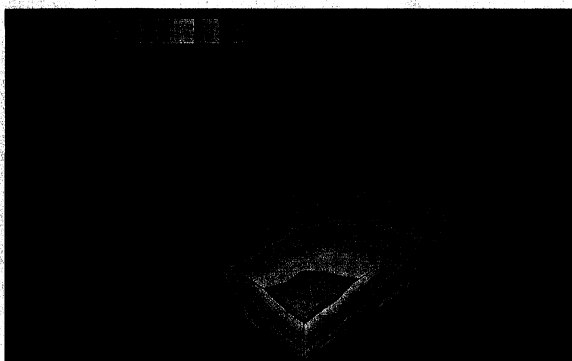
Веќе кажавме дека секој сигнал содржи големо количество на информации во врска со испитуваниот дефект и со негово правилно разбирање, може да се дефинира секој дефект и речиси сите негови карактеристики [7], [8]. Во овој труд ние ќе се задржиме само на неколку типични типови на дефекти и на сигналите со кои тие резултираат. Ќе ги разгледаме следните типични случаи:

(профил).

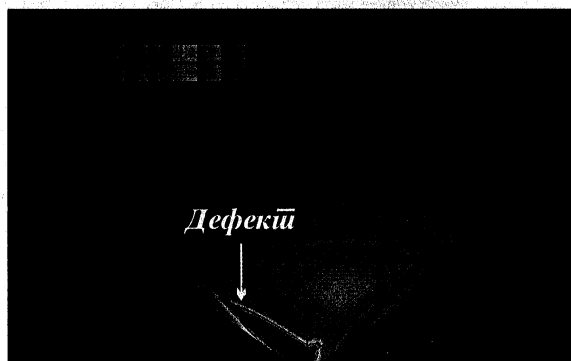
4.1. Типични дистрибуции на вртложните струи низ материјалот

На Сл. 4 се прикажани две типични распределби на вртложните струи во испитуваниот материјал - рамна плоча направена од материјалот **INCONEL** кој најчесто се користи за изработка на цевки во нуклеарната индустрија поради своите одлични физички својства. На сликата лево е прикажана дис-

левиот раб и се наоѓа на истата страна на која се наоѓа и пробата - што значи се работи за внатрешен дефект. Веднаш е забележливо дека поради постоењето на дефектот, вртложните струи се обидуваат да поминат под него, се концентрираат и имаат поголема јачина (црвената боја). Оваа појава не може да се забележи на левата слика каде нема никакаков дефект. Овој зголемен интензитет на вртложни струи ќе резултира соодветно со појак сигнал во самата сензорска намотка. Како што ќе



а) рамна плоча од INCONEL без дефекти



б) рамна плоча од ИНЦОНЕЛ со дефект

Слика 5: Распределба на вртложните струи.

1. дефекти со различна позиција (**ID** и **OD** дефекти),
2. дефекти со различна должина,
3. дефекти со различна дебелина, и
4. дефекти со различна форма

трибуцијата на вртоложните струи во 1/4 од испитуваниот материјал без присуство на дефект. Десната слика го покажува истиот дел од испитуваниот материјал, но овој пат со дефект кој се протега по должината на

видиме подоцна низ текстов, не само аплитудата на сигналот туку и неговата фазна разлика ќе ни помогне за поточно да ги дефинираме карактеристиките на дефектот.

Продолжение во следниот број

продолжение од страна 9

обезбедат потребните средства, поточно да се затвори финансиската конкуренција за изградба на овој хидроелектричен капацитет за кој ќе бидат инвестирани 7,5 милиони германски марки.

И на неодамна одржаната стручна расправа по Нацрт-генералниот урбанистички план на Кичево, е констатирано дека е изготвена техничка документација-идеен проект за реконструкција и проширување на водоводната мрежа на Кичево до 2025 година, каде е предадена водоснабдителна норма за градот и за селата. Притоа се истакнува дека конкуренцијата за водоснабдување на Кичево се задржува, а за потребните количества вода во наредниот период (што ќе недостига), се предвидуваат нови зафати од акумулацијата на Бачишка Река и Грашница, од каде ТЕЦ "Осломеј" ќе се снабдува со технолошка вода, а постојните 200 литри вода во секунда што се користат во технолошкиот процес на термоцентралата ќе останат во цевководот на најдолгиот водовод во државата, односно ќе се користат исклучиво за задоволување на потребите на граѓаните.

Инаку, ХЕЦ "Бачишта" ќе има инсталирана сила од 4,7 мегавати, со годишно производство од 17 до 22 милиона киловат-часови електрична енергија. За супституцијата на водата што сега се користи како индустријска, ќе биде изграден цевковод во должина од околу шест километри од ХЕЦ "Бачишта" до ТЕЦ "Осломеј" и систем за наводнување на обработливите земјоделски површини. Исто така, со овој проект се планира изградба на акумулација на местото каде што Крива Река се влева во Бачишка Река во месноста Дарда Кула со акумулационен зафат од 3,5 милиони кубни метри вода.

В. Таневски

НЕДЕСТРУКТИВНО ТЕСТИРАЊЕ НА МАТЕРИЈАЛИ СО ПОМОШ НА ВРТЛОЖНИ СТРУИ

~ Во овој труд сакаме да направиме еден соопштен осврт на појавите, методите, начинот и резултатите кои се добиваат од недеструктивното испитување на немагнетните материјали со помош на вртложни струи. Ќе покажеме дека овој метод е високо ефективен, брз и сигурен во голем број на практични случаи каде другите методи не можат ефикасно или пак воопшто не можат да се употребат. Ќе се запознаеме со физичките основи на овој метод, неговите можности за апликација, видови на проби како и нивните предности и недостатоци. На крај ќе дадеме и неколку насоки во смисла на подобрување на квалитетот на резултатите како и можни правци за развој и испитувања во оваа област.



Д-р Влатко Чингоски
Сектор за развој и инвестиции,
Електростопанство на Македонија

Nondestructive Material Testing Using Eddy-Currents

Vlatko Cingoski, Ph.D. E.E.
Electric Power Company of Macedonia,
Department of Development and
Investments

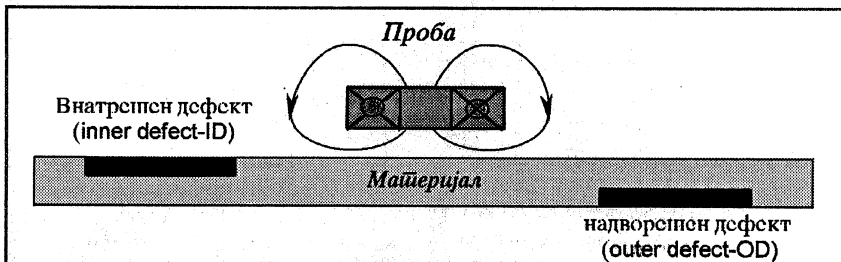
In this paper, a brief overview of the necessities, methods, procedures and obtained results for the nondestructive evaluation of the nonmagnetic materials using eddy-currents is presented. We show that this evaluation method is highly effective, fast and secure for a large scale of practical problems where other methods are not as efficient or they are even not applicable at all. We present the physical foundations for this method, its application possibilities, types of probes (sensors), as well as their advantages and disadvantages. Finally, few remarks for improving the quality and accuracy of the testing results and some possible directions for future research in this area are also presented.

продолжение од минатиот број

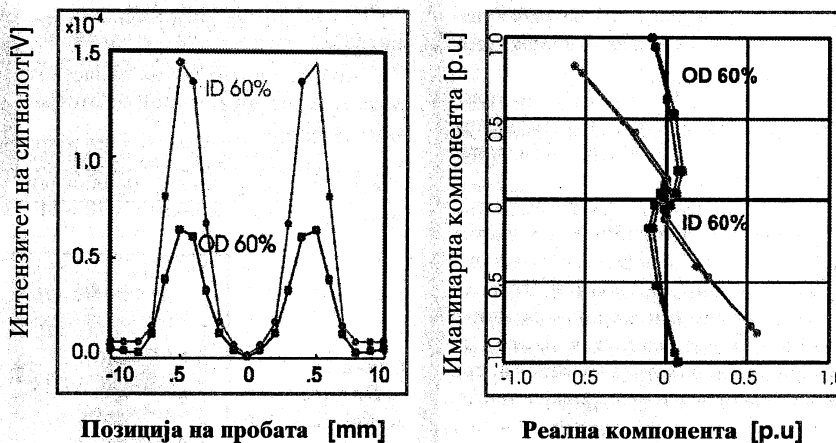
4.2. Дефекти со различна позиција (ID и OD дефекти)

Една од основните карактеристики кои треба да се дефинираат при недеструктивното тестирање е местоположбата и позицијата на евентуалниот дефект. Постојат два типа на основни видови на дефекти: внатрешни дефекти и надворешни

дефекти. Категоризацијата на дефектите е условна и се дефинира според соодносот меѓу пробата и страната на цевката каде се наоѓа дефектот: ако се од иста страна станува збор за внатрешен дефект (inner defect - ID), или ако се од спротивна страна, тогаш станува збор за надворешен дефект (outer defect - OD) (види Сл. 6). На Сл. 7 прикажани се два



Слика 6: Дефиниција на внатрешен и надворешен дефект.



а) Амплитудна карактеристика
б) Фазна карактеристика
Слика 7: Типични сигнали за надворешен и внатрешен дефект од 60%

типични сигнали добиени со помош на пробата со ротационо поле кои одговараат на еден внатрешен и еден надворешен дефект. И двата дефекта се со иста дебелина кој во случај на неdestructивна анализа на високопритисни цевки најчесто се изразува во проценти од дебелината на цевката. Во конкретниот случај се работи за два дефекта кои имаат дебелина од 60 % во однос на дебелината на цевката.

На Сл. 7 се прикажани т.н. аплитудната и фазната карактеристика за два сигнала, еден внатрешен и еден надворешен, добиени за иста дебелина на дефект од 60 %, во однос на дебелината на цевката. Веднаш може да се забележи дека постои голема разлика меѓу двата сигнала, внатрешниот сигнал има поголема амплитуда за повеќе од два пати во однос на надворешниот сигнал. Во однос на фазната карактеристика може да се види дека аголот под кој се појавуваат овие карактеристики е сосема различен. Треба да се напомене и како се добиваат овие карактеристики. Веќе рековме дека сигналот се придвижува со константна брзина над површината на испитуваниот материјал (во нашиот случај пробата се движи во внатрешноста на цевката). Нултата точка на двата графика се поклопува со центарот на дефектот кој има должина од 10 мм.

Пробата се движи паралелно со насоката на дефектот. Секоја точка од кривата одговара за поместување на пробата за 1 мм. Треба да се забележи дека максимална амплитуда на сигналот се добива околу краевите на дефектот. Овој факт ќе го искористиме покасно кога ќе го анализираме влијанието на должината на дефектот врз формата на сигналот. Очигледно е дека со едноставно проследување на сигналот можно е да се изврши систематизација и класификација на дефектот на внатрешен или надворешен де-

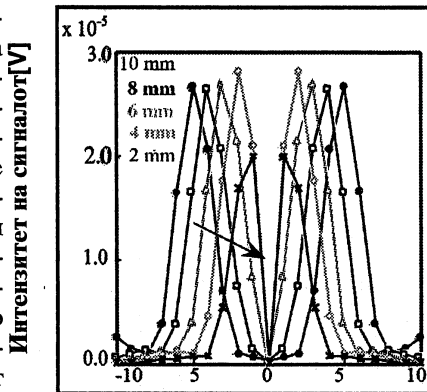
фект.

4.3. Дефекти со различна должина

Најважните карактеристики кои ја дефинираат сериозноста на дефектот се неговата големина, должина и длабочина. Заради тоа најпрво ќе се запознаеме, како се дефинира должината на дефектот според добиениот сигнал од неdestructивната проба. За да го прикажеме тоа, направен е тест со помош на неколку дефекти со различна должина од 2 мм па се до 10 мм. Добиените сигнали за надворешен и внатрешен тип на дефекти се прикажани на сл. 8.

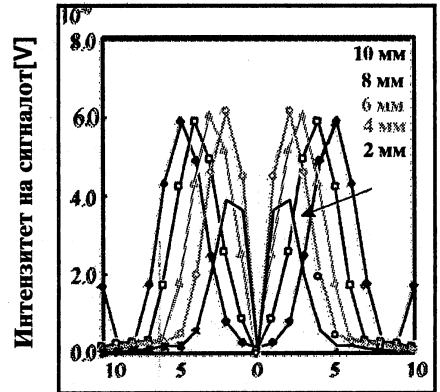
Веднаш може да се забележи дека формата на сигналите е многу слична како за

време да врши детекција и класификација меѓу повеќе сигнали по должината на дефектите и нивната позиција. Покрај овие заклучоци се наметнува уште еден многу важен. Ако го погледнеме сигналот кој одговара на дефектот од 2 мм, ќе видиме дека неговата форма е деформирана и не е во склад со останатите сигнали. Тоа укажува на уште еден многу важен фактор: димензиите на пробата мора да бидат усогласени со големината на дефектите кои се бараат, или со други зборови, најмал дефект кој може да се детектира со една проба, е со мерка на големина еднаква со големината на пробата. Ова го наметнува проблемот со детекција на многу мали дефекти што во овој момент не е доволно точно решен со помош на современите проби, напротив изискува



Позиција на пробата [mm]

а) Внатрешен дефект 20 %



Позиција на пробата [mm]

б) Надворешен дефект 20 %

Слика 8: Зависноста на сигналот во функција од должината на дефектот

внатрешните така и за надворешните дефекти. Но, исто така може да се заклучат и следните две многу важни информации:

Растојанието меѓу пиковите (амплитудите) на секој сигнал поодделно ја дава точно должината на дефектот во мм, и

Амплитудата на сигналот е поголема речиси два пати за внатрешните сигнали во однос на надворешните.

Имајќи ги во предвид овие два заклучока, не е тешко да се изработи едноставен експертски систем кој ќе може во секое

постојано истражување и изнаоѓање на поквалитетни и поусовршени типови на детектори.

4.4. Дефекти со различна длабочина

Диагностицирање на длабочината на дефектите заедно со нивната должина, е едно од најважните особини кои една неdestructивна проба мора да го има. Причината за тоа лежи во фактот што од овие два параметри на дефектот во најголема мерка зависи сериозноста на дефектот и неговото влијание врз сиг-

урноста на процесот кој се одвива. Заради тоа конструирање на проби кои можат со голема точност да направат класификација на дефектите по нивната должина и длабочина, едновремено можат да извршат и нивна класи-

белина. Како што веќе кажавме, длабочината на дефектите обично се изразува во проценти од дебелината на цевката. На сл. 9 дадени се четири графици на кои се прикажани добиените сигнали за шест видови на дефекти: три внатрешни

фазните карактеристики на сигналите.

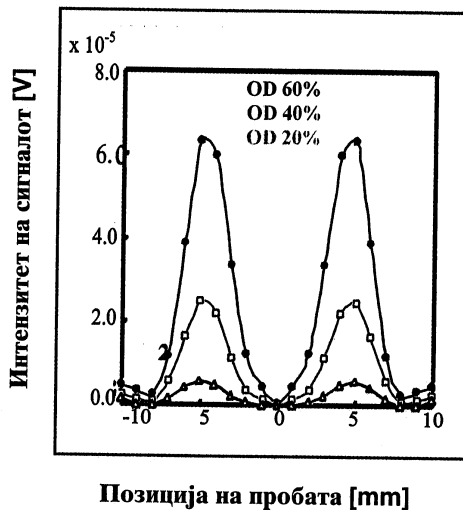
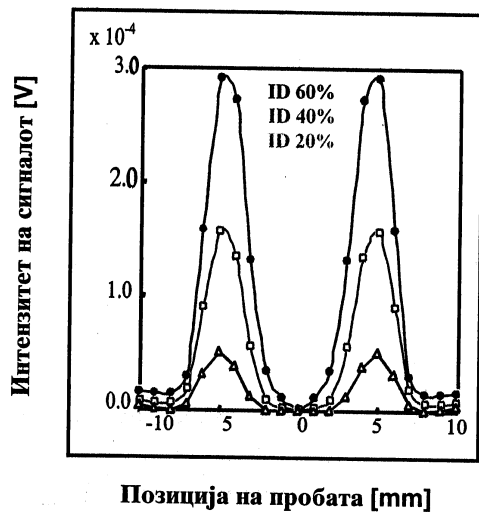
Да погледнеме кои информации може да се добијат од сигналите прикажани на Сл. 9. Најпрво може да се забележи дека амплитудите на сигналот можат да ја дефинираат

длабочината на сигналот, како и видот на дефектот, внатрешен или надворешен. Но, интензитетот на сигналот не може еднозначно да ја дефинира длабочината и позицијата на дефектот затоа што на пример, надворешен сигнал со длабочина од 60% има интензитет на сигналот кој има речиси иста вредност како и сигнал на внатрешен дефект со длабочина од 20%. Тука на помош може да се користи фазната карактеристика која го додефинира сигналот еднозначно. Имено, ако ги погледнеме сл. 9 в) и г) може да заклучиме дека:

с фазните карактеристики кои се добиваат за внатрешни дефекти се поместени во спротивна насока од насоката на стрелките на часовникот со намалување на длабочината на дефектот, и обратно с фазните карактеристики за надворешни сигнали се вртат во насока на стрелките на часовникот со намалување на длабочината на дефектот.

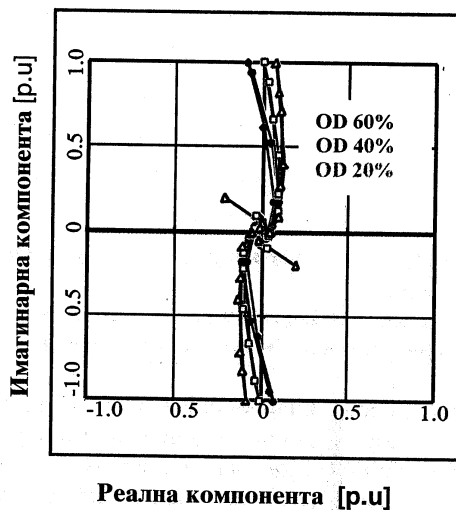
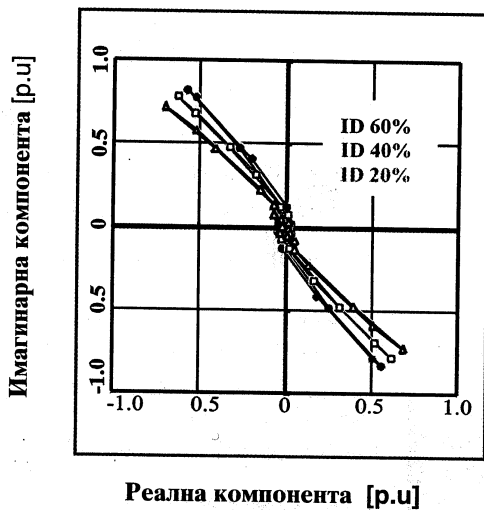
Користејќи ги овие две карактеристики, можно е еднозначно да се

дефинира големината, должината, длабочината и позицијата на дефектот со што е овозможена неговата точна детекција и систематизација. Да напомене дека во горенаведениот случај третирали се дефекти со иста



а) внатрешни дефекти

б) надворешни дефекти



а) внатрешни дефекти

б) надворешни дефекти

Слика 9: Амплитудни и фазни карактеристики на сигналите за внатрешни и надворешни дефекти со различна дебелина.

фикација по нивната опасност. Пробата со ротирачко поле која овде ја разгледуваме дава извонредно прецизни резултати врз основа на кои може да се изврши детекција, а со тоа и класификација на дефекти со различна де-

трешни сигнали со три различни дебелини (ID20%, ID40% и ID60%), и три надворешни дефекти со истите дебелини (OD20%, OD40% и OD60%). Сл. 9 а) и б) ги даваат амплитудните карактеристики, додека сликите в) и г)

должина (10 мм) што може веднаш да се забележи од амплитудната карактеристика. Кај сите сигнали амплитудите на сигналот се јавуваат во крајните точки од дефектот (+/- 5 мм) што укажува на фактот дека вистинската должина на дефектот е точно 10 мм.

4.5. Дефекти со различна форма (профил)

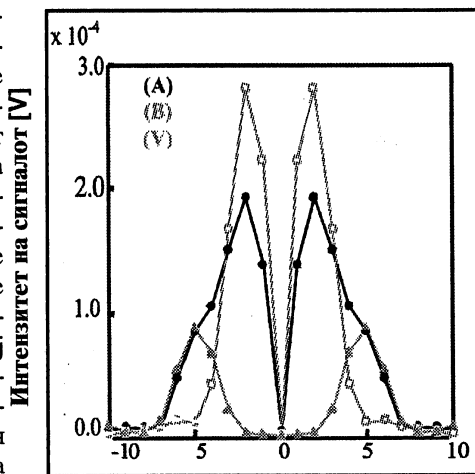
Детекцијата на формата (профилот) на дефектот е еден од најголемите проблеми при неdestructивната анализа на квалитетот на материјалот. Со оглед на важноста на точното определување на профилот на дефектот, особено внимание се посветува на конструирање на проби кои можат што поточно да го дефинираат тој профил врз основа на добиениот сигнал. Овде ќе прикажеме само еден типичен пример за дефект кој има скалест профил. На сл. 9 а) прикажани се три типични сигнали, скалест профил (А), длабок и краток внатрешен дефект (Б) и плиток и долг дефект (В). Да напоменеме дека дефектот со скалест профил (А) може да се добие како комбинација на дефектите со профили (Б) и (В). На сл. 9 б) се прикажани и добиените сигнали за сите три дефекти. Веднаш може да се заклучи дека слично на начинот на добивање на дефектот (А) како суперпозиција од дефектите (Б) и (В), исто така и сигналот добиен за дефектот (А), може да се добие како суперпозиција на сигналите добиени за дефект (Б) и (В): имено надворешниот дел од сигналот за профилот (А) одговара на истиот тој дел од сигналот за профилот (В), и обратно во централниот дел на сигналот имаме соодветен сигнал кој одговара на централниот сигнал добиен за профилот (Б). Накратко кажано, со помош на искуство

или соодветно конструиран експертен систем, детекцијата на комплексни дефекти е сепак возможна.

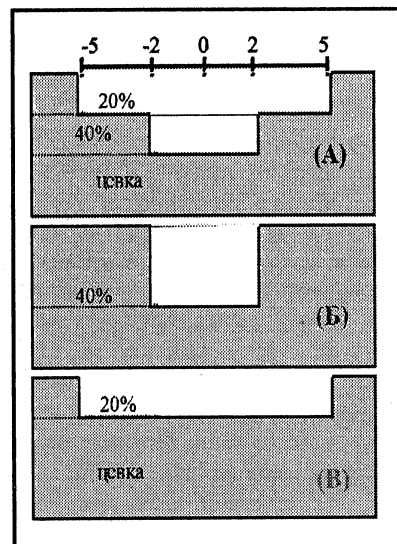
5. Што и како понатака?

Се поставува пршањето дали при постоење на вака софистицирани проби за неdestructивна анализа на материјалите, има простор за поната-

Но, како што овде прикажавме, процесот на детекција е брз, сигурен и точен само во случај на геометриски и материјално "чисти" испитни материјали. Што тоа значи во пракса? Ние овде третиравме релативно едноставни форми на испитен материјал - најголемата комплицираност доаѓаше од фактот што материјалот не беше рамна плоча туку цевка. Тука мора, комплицира-



Позиција на пробата [mm]



Слика 10: Сигнали добиени за неколку различни профили на внатрешни дефекти.

мошен нивен развој и ако постои, во кои правци би се одвивал тој развој. Веднаш да кажеме дека методологијата на неdestructивни тестови е сеуште многу далеку од својот зенит и дека постојат уште многу интересни и корисни идеи кои треба да се опфатат при идните истражувања во оваа област. Овде во овој параграф, накратко ќе се запознаеме со некој од овие можни области за истражување.

Веќе неколку пати напоменавме дека методата на неdestructивно тестирање со помош на вртложни струи има една многу важна особина, а тоа е можноста да се вршат профилатички испитувања како и детекција на квалитетот на материјалот речиси во работни услови.

носта на испитуваниот материјал да се усложни и доведе до реалност. За таа цел потребно е да се земат во предвид следните неколку фактори:

попречниот пресек на цевката не е константен по целата должина на испитуваниот материјал. Ова може да биде резултат како на потребите во технолошкиот процес (на пример, за зголемување или намалување на притисокот на пареата или топлата вода што протекува низ цевката), така и на несовршеноста на изработката. И двата случаеви резултираат со зголемен интензитет на бука во сигналот (noise) што доведува до грешки во мерењата, а со тоа и до грешки во детекцијата и естимацијата. За жал треба да се наведе дека



токму тие делови на цевката каде таа се проширува или стеснува се најкритични за појавата на дефекти во материјалот поради зголемените напрегања на материјалот во тој предел.

цевките најчесто не се самоносиви, туку се прицврстени или потпрени со или врз други делови кои помалку или повеќе се магнетни (челик) или немагнетни (бакар). Овие потпорни делови доведуваат до големи грешки при детекцијата на сигналите и мора да бидат адекватно земени во предвид. За жал се уште не се појавиле сензори (проби) кои можат да прават селекција на сигналите во зависност од нивниот извор.

цевките не се изведени од еден ист материјал туку најчесто станува збор за крути споеви изведени со заварување. Секој заварен спој е потенцијален извор на дефекти, шуплини во материјалот и сл. Од друга страна, термичките удари врз материјалот како резултат на заварувањето во голема мерка ја менуваат структурата на материјалот во делот на варот. Според тоа, сите параметри што важат за еден тип на материјал, по правило не можат да се земат истоветно и за дел од материјалот кој е заварен.

на крај да кажеме дека при анализата на дефектите прикажани во овој труд, ние третираме дефекти со конечни димензии, должина, длабочина и позиција на дефектот. Но, во реална ситуација, најчесто дефектите се премногу мали за да можат да им се припишуваат

овие димензионални карактеристики. Според тоа, потребни се проби или сензори кои ќе можат да работат со дефекти без дебелина, или дефекти со инфинитивно мала дебелина. Ова пак значително ги усложнува условите за детекција.

Кога на сето горенаведено ќе се додадат и барањата за што побрзо тестирање, особено кога се работи за големи објекти каде бројот и должината на цевките е значајно голем, како и фактот дека сензорите (пробите) мора да бидат релативно лесни (по габарит) и лесни за употреба дури и на релативно непрофесионален тим на испитувачи, тогаш веднаш доаѓаме до заклучокот дека потребата од понатамошни истражувања во оваа насока е значителна. Користењето на нови и експертски системи базирани на неуро-мрежи, генетски алгоритми, fuzzy-logic системи и вештачка интелигенција стануваат се подоминантен дел и заземаат главен простор при конструкцијата и изработката на модерните проби за недеструктивна детекција.

6. Заклучок

Во овој труд се обидовме да направиме рекапитулација на методите за недеструктивна анализа на електрично проводни материјали со помош на вртложни струи. Најпрво дадовме краток историски преглед на методот и се осврнавме на неговите предности и недостатоци во однос на некои други методи. Се запознавме со некои видови на проби кои имаат повеќе историско отколку апликативно значење, за потоа подетално да се запознаеме со еден типичен претставник на модерните видови на проби, т.н. проба со ротирачко поле. Видовме на што се базира

нејзиниот принцип на работа, а исто така и научивме како се читаат и анализираат резултатите (сигналите) кои се добиваат со помош на овој вид на проба. Анализираме неколку типични случаи каде беа анализирани и класифицирани повеќе типови на дефекти кои најчесто се јавуваат во обичниот живот, а тоа се дефекти со различна должина, длабочина, профил како и позиција во однос на сензорот и материјалот кој се испитува. На крајот на трудот дадовме и неколку насоки каде истражувањата во оваа област се концентрираат во последните години со идеи за идните истражувачи кои би сакале да се обидат во ова поле. Покажавме дека станува збор за многу перспективна област како за истражување така и за практична примена со што би се постигнала многу посигурна работа на процесите кои денес се третираат како процеси со висок ризик како што се процесите во гасната и нафтената индустрија, а особено во нуклеарната техника.

Благодарност

Авторот сака да ја искиже својата благодарност на Проф. Д-р Хидео Јамашита со кого поголем дел од овие истражувања авторот ги вршеше за време на својот престој на Универзитетот во Хирошима, Јапонија. Исто така сакам да се заблагодарам на колегите при Јапонското Друштво за Применета Електромагнетика (JSEAM - Japan Society for Applied Electromagnetics) со кои заеднички е конструирана пробата со ротирачко поле која е користена во овој труд. На крај, благодарност и за компанијата за нуклеарна технологија при Јапонската корпорација (Mitsubishi Nuclear Fuels) која го финансираше овој проект во целост.

Литература

[1] R. Collins et al., (Eds.) "Nondestructive Testing of Mate-

rials", ISBN: 90 5199 2394, IOS Press, Amsterdam, 1995.

[2] **T. Takagi et al.**, "Banchmark Models of Eddy Current Testing for Steam Generator Tube: Exprimment and Numerical Analysis", International Journal of Applied Electromagnetics in Materials, 5 (1994), 149-162.

[3] **Z. Badic, Y. Matsumoto, S. Kojima, Y. Usui, K. Aoki, F. Nakayasu and A. Kurokawa**, "Electromagnetic Nondestructive Evaluation", IOS Press, pp. 303-309, 1997.

[4] **M. Hashimoto et al.**, "ECT

Research Activities in JSAEM - Banchmark Models of Eddy Current Testing for Steam Generator Tube - Part 2", ISBN: 90 5199 2394, IOS Press Amsterdam, 1995, 313-260.

[5] **M. Hayakawa, V. Cingoski, K. Kaneda and H. Yamashita**, "Evaluation of Two Types of Edge Finite Elements for 3D Nondestructive Eddy Current Testing Compuation", Proceedings of the Asian Joint Seminar on Applied Electromagnetics, Tokyo (1997).

[6] **V. Cingoski, M. Hayakawa, K. Kaneda and H. Yamashita**, "On the Properties of Mixed ConsistenTly and Non-Con-sis-

tently First Order Edge Finite Elements", Proceeding of the IGTE'98 Conference, Graz, Austria (1998).

[7] **H. Hosokawa and K. Ogawa**, "Eddy Current Testing Probe using Rotating Direction Eddy Current", The Japanese Society for Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 3, No. 3, (1995), 36-42.

[8] **M. Hayakawa, V. Cingoski, K. Kaneda and H. Yamashita**, "Evaluation of Characteristics of a Rotating Eddy-Current Probe for ECT using Edge FEM", Electromagnetic Nondestructive Evaluation (II), R. Albanese et al. (Eds), IOS Press, (1998), 170-17

ЦЕНТРАЛНО ГРЕЕЊЕ И ЗА ЧАИР, ТОПАНСКО ПОЛЕ И СКОПЈЕ СЕВЕР

Топланата Скопје Север ќе се тестира во септември

Проблеми може да се јават доколку мнозинството од домаќинствата не се согласат нивната зграда да се приклучи на централното греење, затоа што во тој случај приклучувањето нема да биде исплатливо

Изградбата на топланата Скопје-Север, преку која од идната грејна сезона жителите на населбите Топанско поле, Скопје-Север и Чаир во своите домови ќе добијат топли радијатори, е во завршна фаза. Потребната опрема за про- функционирање на топланата веќе се монтира и се очекува да се комплетира до средината на септември кога и овој објект пробно ќе се пушти во работа. Досега се изведени околу 5,5 километри од магистралната и секундарната топлификациона мрежа, поточно до населбите Скопје Север и Топанско Поле, а во тек е поставувањето на водовите на улицата Цон Кенеди.

На оваа топлана ќе може да се приклучат само колективните стамбени објекти, додека индивидуалните засега не се опфатени со овој проект. Околу условите и начинот за приклучување на топлификационата мрежа заинтересираните, преку претставници на кукните совети, можат да се информираат во АД "Топлификација". За да можат жителите од населбите Скопје Север, Топанско Поле и Чаир полесно да дојдат до информации во врска со приклучувањето на топлификационата мрежа, Топлификацијата обезбеди стручно лице на кое ќе може да му се обратат. Претставник на оваа претпријатие секој работен ден ќе се наоѓа во просториите на Месната заедница Рајко Жинзифов, и од 17 до 19 часот ќе контактира со сите оние кои се заинтересирави да се приклучат на централното греење.

Истовремено со изведбата на магистралната и секундарната мрежа, моментно се работи и на поставување на приклучоци од приклучните шахти до потстаниците на објектите кои веќе имаат внатрешна инсталација. Тоа се колективните објекти кои се наоѓаат на улиците Боро Менков, Гоце Стојчески и Тале Христов. Поради тоа, за да се монтираат приклучоците што побрзо, во интерес и на станарите на овие објекти е да им овозможат на нашите екипи непречен пристап до визбените простории, вели Рисо Спировски, помошник-директор за развој во "Топлификација". Дополнителни проблеми може да се јават доколку мнозинството од домаќинствата не се сложат нивната зграда да се приклучи на централното греење. Во таков случај, додава Спировски, тој објект нема да се поврзе на топлификационата мрежа; бидејќи тоа нема да биде економски исплативо. Доколку, пак, помал дел од станарите не сакаат да се приклучат, треба само да дозволат цевките за централното греење да минуваат преку нивните станови.

Инаку станарите на овие згради во кои има поставено внатрешна инсталација, за поврзување од приклучната шахта до потстаницата треба да платат по 200 германски марки за метар должина, а вкупната цена потоа се дели на бројот на домаќинствата што ќе се приклучат. Оние, пак, кои во своите домови немаат внатрешна инсталација, за нејзино поставување ќе треба да платат по 50 германски марки за квадратен метар стамбена површина.

T.M