



## Non-destructive Research for the Assessment of the Structure and Stress State of Materials

Yonka IVANOVA

<sup>1</sup> Sofia University “St. Kliment Ohridski”, Faculty of Physics, Sofia, Bulgaria  
email: [yonivan@phys.uni-sofia.bg](mailto:yonivan@phys.uni-sofia.bg)

<sup>2</sup> Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

### Abstract

This work presents completed and published research results under Project No. BG05M2OP001-1.002-0011 “Building and Development of a Center for Competence in Mechatronics and Clean Technologies MIRACLe (mechatronics, innovation, robotics, automation, clean technologies)”, financed by Operative program “Science and education for intelligent growth”, co-financed by the European Regional Development Fund on the subject, “New methods and means for control and testing of mechatronic elements and systems” at the Institute of Mechanics – BAS.

**Keywords:** Non-destructive research, Non-destructive assessment, Structure, Stress state, MIRACLe project, Contract BG05M2OP001-1.002-0011-C02

## Безразрушителни изследвания за оценяване на структурата и напрегнатото състояние на материали

Йонка ИВАНОВА

### 1. Увод

По проект MIRACLe – BG05M2OP001-1.002-0011-C02 в тематичното направление „Нови методи и средства за контрол и изпитвания на мехатронни елементи и системи“ в Институт по механика –БАН е създадена лаборатория „Мониторинг, безразрушителен контрол, изпитвания и характеризирание на мехатронни системи“. По същия проект беше закупено оборудване, което представлява комплект от апарати за безразрушително изследване на материали в различни индустриални области, включително и в мехатрониката:

- Ниско и високочестотна ултразвукова сканираща система;
- Система за измерване на времето и разпространение на ултразвукови вълни;
- Апаратура за вихровотоков метод;
- Апаратура за акустична емисия.

По проекта MIRACLe по отношение на безразрушителния контрол в Институт по механика-БАН са предвидени следните научно-изследователски дейности, които са свързани с определяне, анализ и оценка на механичните характеристики, напрегнатото състояние, свойствата и експлоатационната надежност на материали и конструкции, използвани в мехатрониката, роботиката и във водещи индустриални отрасли като транспорт, енергетика и т.н. при различни режими на натоварване чрез съвременни

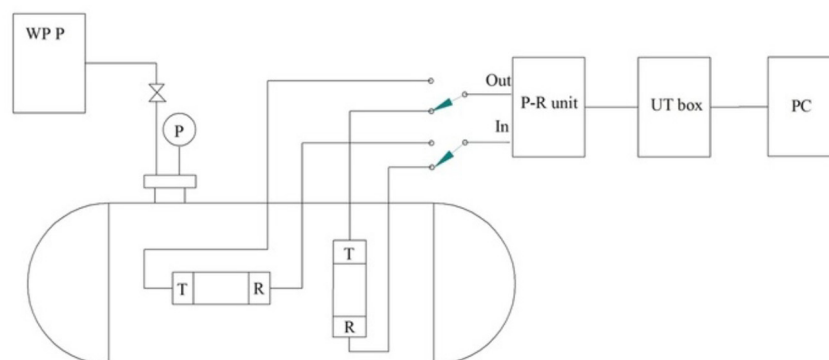
експериментални, безразрушителни и вибродиагностични техники и методи за изпитване.

В лабораторията „Мониторинг, безразрушителен контрол, изпитвания и характеризиране на мехатронни системи“ бяха проведени научни изследвания в няколко направления:

- Изследване на механичното напрегнато състояние на тънкостенни съдове под налягане с използване на ултразвукови методи.
- Изследване на възможностите на електромагнитен магнитношумов метод за контрол на качеството на термична обработка на стомани с приложение в транспорт, енергетика, машиностроене и др.отрасли с цел оценка на остатъчния технически ресурс на конструктивни елементи.
- Експериментално изследване на композитни материали с полимерна матрица при наличие на нееднородности и дефекти от типа на пукнатини под действие на различни по характер натоварвания.

## 2. Изследване на напрегнато състояние на тънкостенни съдове под налягане с използване на ултразвукови методи

В [1] се представя експериментално изследване на разпространението на ултразвукови вълни на Релей в стените на съд под налягане. Възможността за оценка на напреженията чрез ултразвукови методи се основава на акустоеластичния ефект. Експериментите бяха проведени с помощта на хидравличен тест, проведен в съд под налягане. Измерванията на времето за преминаване на ултразвуковата повърхностна вълна в стените на съда в аксиална и периферна посока се извършват при промяна на налягането до 7 МРа при постоянна температура. Бяха открити корелации между относителните промени във времето на преминаване на вълните и промяната в налягането. Влиянието на температурата и термичните напрежения върху скоростите на ултразвуковите вълни не се отчита.



Фигура 1. Експериментална установка [1]

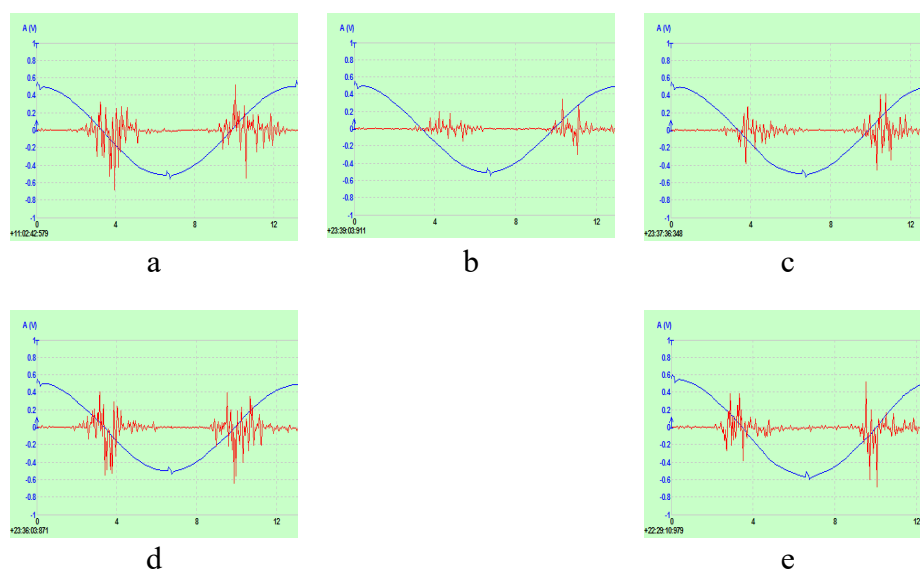
Някои от получените резултати са показани в Таблица 1 [1].

Pressure p, MPa	Estimated Hoop stress $\sigma_1$ , MPa	$\frac{\Delta f_{R1}}{f_{R01}}$ , %	Estimated axial stress $\sigma_2$ , MPa	$\frac{\Delta f_{R2}}{f_{R02}}$ , %
0	0	0	0	0
1.0	30	0.0320	15	0.0390
2.0	61	0.0820	30	0.0510
3.0	91	0.1000	45	0.0710
4.0	121	0.1400	61	0.0730
5.0	151	0.1500	76	0.0830
6.0	182	0.1650	91	0.0878
7.0	212	0.1900	106	0.0891

### 3. Изследване на възможностите на електромагнитен магнитношумов метод за контрол на качеството на термична обработка на стомани с приложение в транспорт, енергетика, машиностроене и др. отрасли с цел оценка на остатъчния технически ресурс на конструктивни елементи

В [2] се представят резултатите от изследване, проведено върху пробни тела от качествена термично обработена въглеродна стомана чрез метода на магнитния шум. Целта на работата беше да се намерят подходящи информативни параметри за идентифициране на получените структури с различна твърдост. За тази цел бяха приготвени образци чрез термична обработка при различни температури. След микроструктурен анализ и измерване на твърдостта, образците бяха изследвани с помощта на метод на магнитния шум. Сигналите бяха визуализирани и анализирани чрез цифров осцилоскоп и софтуерната програма Multi Instrument 3.8. Информационните параметри RMS и времето за регистриране на сигналите от магнитен шум бяха използвани за идентифициране на получените микроструктури с различни характеристики и твърдост.

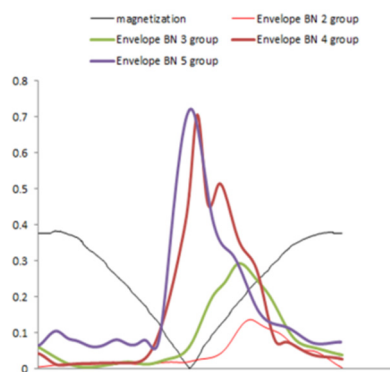
Фигура 2 показва част от записи, извършени по време на намагнитването на тестваните пробни тела и магнитните шумове, които се появяват при ток на намагнитване от 200 mA.



Фигура 2. Записи на магнитни шумове във времето, получени от тестваните групи проби при намагнитващ ток от 200 mA: група образци 1 (a), група 2 (b), група 3 (c), група 4 (d), група 5 (e).

Най-ниски RMS стойности имат образците, подложени на закаляване и нискотемпературно отвръщане, които имат микроструктура отвърнат мартензит. При останалите групи образци /3, 4, 5/ се наблюдава повишаване на RMS стойността, което може да се обясни с вида на получените микроструктури троостит и сорбит. След обработката на сигналите от магнитните шумове бяха определени обвивките на магнитните шумове и пиковите стойности [2].

Времето на поява на магнитен шум, определено от максималната стойност на обвивката на сигнала спрямо нулевата стойност на полето на намагнитване, се определя като параметър, който се използва за идентифициране на типа микроструктура. Фигура 3 показва обвивките на магнитните шумове от пробните тела. Има изместване на пиковите стойности при стойност на полето нула, както и разлики във формата на обвивката. В мартензитните структури пиковата стойност е малка и обвивката на магнитния шум е широка. При прехода от отвърнат мартензит с висока твърдост към троостит и сорбит с твърдост, близка до първоначалната, се наблюдава повишаване на пиковите стойности и изостряне на обвивката на магнитния шум при стойности на магнитното поле около нула.



**Фигура 3. Обвивки на магнитните шумове при ток на намагнитване  $I_n = 150$  mA, получени от тестваните групи образци с различна микроструктура**

Разликите в изместването във времето, както и във формата на магнитния шум могат да се обяснят с необратимото движение на доменните стени при преодоляване на препятствия, дължащи се на особеностите в различните микроструктури, т.е. микроструктурата на материала пряко влияе върху динамичното поведение на магнитните домени по време на намагнитване.

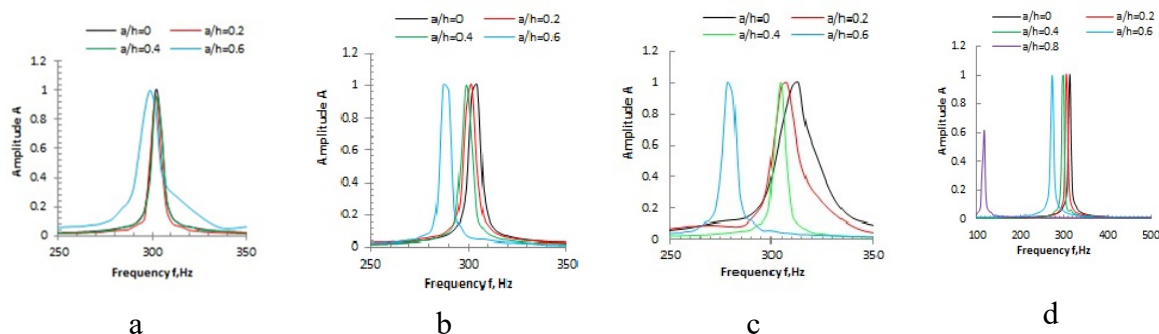
Чрез изследване на подходящо обработени образци от стомана с помощта на метода на магнитния шум бяха получени данни за серия от магнитошумови импулси като функция на времето и съответните стойности на магнитното поле. За характеризиране на шумовите сигнали бяха използвани различни параметри като RMS на шума, броя на магнитния шум за цикъл на намагнитване и т.н.

Беше установено [2], че времето на регистриране на шума, определено от нулевата точка на синусоидалната вълна на намагнитване до максималната стойност на обвивката на магнитния шум, е подходящ информативен параметър за анализ на микроструктури. След обработката на сигнала са определени стойностите на този параметър и е анализирано изменението му поради особеностите в микроструктурите, получени след термична обработка. Установени бяха линейни зависимости между RMS, времето на възникване на магнитния шум и твърдостта на структурите, получени след термична обработка [2].

#### 4. Експериментално изследване на композитни материали с полимерна матрица при наличие на дефекти от типа на пукнатини под действие на различни по характер натоварвания чрез модален анализ

В [3,4] са публикувани резултати от експериментални изследвания на композитни материали, тип стъклопласти с използване на вибрационен метод чрез импулсно възбуждане на свободни огъвачи [3] и надлъжни трептения [3,4]. От композитна плоча тип стъклопласт със съдържание на стъклени влакна е 50% бяха изрязани достатъчен брой образци тип греда с размери  $L=0,25\text{m}$  дължина,  $b=0,025\text{m}$  ширина и  $h=0,005\text{m}$  дебелина. За да се установи чувствителността на метода с импулсно възбуждане на трептения за откриване на дефекти, бяха симулирани дефекти от тип правоъгълен прорез на различни разстояния от ръба на образците ( $x_i$ ), а именно на  $0,1L$  и  $0,2L$ ,  $0,3L$  и  $0,5L$ . Прорезите са напречни, разположени перпендикулярно на подредените слоеве стъклопакет. Симулираните канали бяха с различна дълбочина, равна на  $0,2h$ ,  $0,4h$ ,  $0,6h$  и в някои случаи  $0,8h$ . Бяха направени и изследвани достатъчен брой проби, за да се изследва местоположението на изкуствените дефекти при фиксирана дълбочина на дефекта.

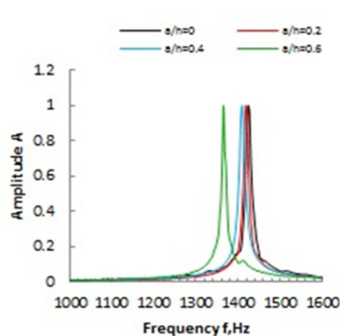
Целта на изследването беше да се изследва ефектът на пукнатините върху естествените честоти на възбудени огъвачи и надлъжни трептения на греди от стъклопласт. Първите собствени честоти на вибрации при огъване извън равнината и в равнината, както и надлъжните вибрации са използвани за характеризирание на единична греда с дефекти. Изследвано е и влиянието на местоположението и дълбочината на изкуствените пукнатини.



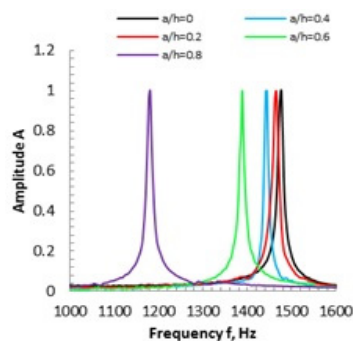
**Фигура 4. Първа собствена честота на изпитване на вибрации при огъване за здрави греди и повредени греди а) прорези, разположени при  $x=0,1L$  с различни дълбочини  $a=0,2h$ ,  $a=0,4h$ ,  $a=0,6h$ ; б) прорези, разположени при  $x=0,2L$  с дълбочини  $a=0,2h$ ,  $a=0,4h$  и  $a=0,6h$ . в) прорези, разположени при  $x=0,3L$  и дълбочини  $a=0,2h$ ;  $a=0,4h$ ;  $a=0,6h$ , д) прорези, разположени при  $x=0,5L$  с дълбочини  $a=0,2h$ ;  $a=0,4h$  и  $a=0,6h$ .**

Най-значимите промени в първата резонансна честота се получават при пукнатина в средата на композитните греди. При дълбочина на пукнатината  $3\text{ mm}$  честотното изместване достига 14%. Допълнително е изследвана греда с дълбочина  $a=0,8h$ . Резултатите показват относителна промяна от около 64%.

Резултатите от експериментите при огъвачи трептения в равнината на огъване са показани на фигура 5, където са дадени честотните характеристики за греди с изкуствени дефекти на разстояния  $x=0,3L$  и  $x=0,5L$ . Относителното изместване на първата резонансна честота не се забелязва при местоположението на дефект  $x/L=0,1$ . С увеличаването на параметъра  $x/L$  честотата намалява и достига 6% за най-дълбоката пукнатина.



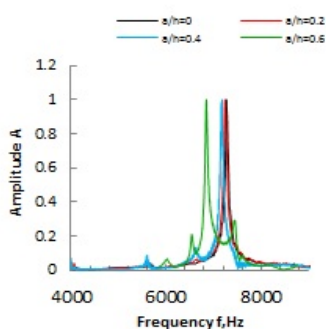
a



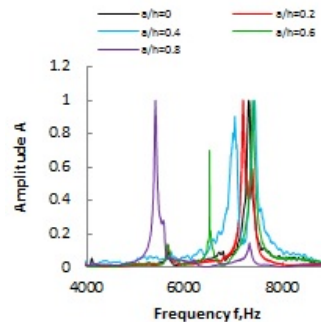
b

**Фигура 5. Първа резонансна честота за вибрации при огъване в равнината а) местоположение на дефекта  $x/L=0,3$ , дълбочина на дефекта  $a/h = 0,2, 0,4$  и  $0,6$ ; б) местоположение на дефекта  $x/L=0,5$  и дълбочини  $a/h = 0,2; 0,4; 0,6$  и  $0,8$ .**

Резултатите от изпитванията на режим на надлъжни трептения са показани на фигура 6. Промените в честотите при пукнатина, разположена в средата на образци достига от 11% до 26%. Ако се оцени енергията на импулсния удар, може да се заключи, че при такава малка импулсна енергия напреженията и деформациите са много малки. Поради тази причина се регистрира значително намаляване на резонансната честота, когато дебелината на материала на мястото на дефекта е поне 5 пъти по-малка от дебелината на образца.



a



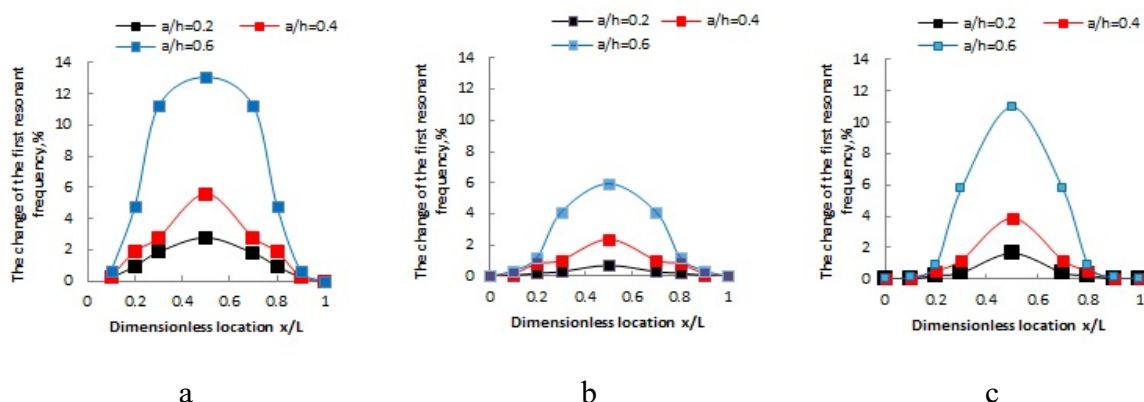
b

**Фигура 6. Първи резонансни честоти на надлъжни тестове а)  $x/L=0,3$  и дълбочини на дефекти  $a=0,2h; a=0,4h$  и  $a=0,6h$  б)  $x/L=0,5$  и дълбочини на дефекта  $a=0,2h; a=0,4h; a=0,6h$  и  $a=0,8h$ .**

Ефектът на пукнатината върху резонансната честота се проявява различно в режимите на трептене и зависи от закрепването на гредата, както и от формата, местоположението и дълбочината на пукнатината. За напречни пукнатини увеличаването на дълбочината на пукнатината води до намаляване на честотата. Пукнатина с определена дълбочина и ширина предизвиква различни честотни промени в експерименталните режими на вибрации, в зависимост от местоположението на пукнатината.

Фигура 7 представя влиянието на положението и дълбочината на дефекта тип пукнатина върху резонансната честота при огъващи и надлъжни трептения. Максимално отместване в резонансната честота се получава при най-дълбоката пукнатина ( $a=0,6h$ ),

разположена на разстояние  $x=0,5L$ . Изместването на честотата е съответно 13%, 6% и 11% за огъващи трептения извън равнината, в равнината и за надлъжни трептения.



**Фигура 7. Ефект от местоположението на дефекта върху честотното изместване а) огъване извън равнината; б) огъване в равнина; в) надлъжни трептения**

Беше установено, че има определени места, където увреждането, т.е. пукнатината почти не променя честотата и те са близо до възловите линии на закрепване на гредата [4]. Ако пукнатината е разположена на места, където кривината на модалната форма има максимални стойности, се получават най-големите промени в честотата. Най-добра чувствителност за откриване на пукнатини се получава при изпитванията, когато пукнатината е в средата на гредата с трептения на огъване извън равнината [4].

Приносът на изследването [3,4] е, че е направено ново системно експериментално изследване на устойчивостта на повреди на широко използвани композитни материали с използване на комбинация от огъващи и надлъжни трептения.

### Благодарности:

Настоящата разработка се осъществява с финансовата подкрепа на договор Проект № BG05M20P001-1.002-0011 „Изграждане и развитие на Център за компетентност по мехатроника и чисти технологии MIRACle (mechatronics, innovation, robotics, automation, clean technologies)“, финансиран от Оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж“, съфинансиран от Европейския фонд за регионално развитие (ЕФРР).

### Литература

1. Y. Ivanova, Study of Mechanical Stresses in Thin-Walled Pressure Vessels Using Ultrasonic Methods, *Materials Research*. 2022; 25:e20210495.
2. Y. Ivanova, Investigation of Heat-Treated Steels Using the Magnetic Noise Method, *Machines. Technologies. Materials.*, Vol. 16 (2022), Issue 4, pg(s) 138-141.
3. Y. Ivanova, Defect detection by frequency analysis of flexural vibrations of free-free composite beam, *Industry 4.0*, Vol. 7 (2022), Issue 6, pg(s) 219-221.
4. Y. Ivanova, Damage Detection in Free-Free Glass Fiber Fabric Composite Beams by measuring Flexural and Longitudinal Vibrations”, *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 13, no. 3, pp. 10685–10690, Jun. 2023.