



ОЦЕНКА НА ЕЛАСТИЧНИ СВОЙСТВА НА МЕТАЛИ ЧРЕЗ БЕЗРАЗРУШИТЕЛНИ МЕТОДИ. ПРИЛОЖЕНИЕ

Иван Коларов
ikolarov@vtu.bg

*Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”
София, ул. „Гео Милев” № 158
РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ*

Ключови думи: безразрушителна оценка на еластични свойства на метали.

Резюме: В работата се прави анализ на често използвани безразрушителни методи за оценка на еластични свойства на еластични среди и изисквания за изследваните образци за получаване на достоверни данни. Акцент се поставя върху изискванията, на които следва да отговарят изследваните проби по отношение на геометрични размери, еднородност на структурата и типични причини за възникване на методически грешки. Разгледани са следните методи: вибро-акустичен, ултразвуков и магнитошумов. Описани са физическите основи за определяне на целеви характеристики на материалите и са получени експериментални данни в зависимост от конструктивните особености на изследваните образци.

Докладът е разработен по научен проект, посветен на изследване на механични свойства на топлоустойчиви стомани с допълнителна химико-термична обработка и ще послужи за обосновка при избор на безразрушителен метод съобразно съществуващите за научното изследване образци.

ВЪВЕДЕНИЕ

Безразрушителният контрол на еластичните свойства е традиционен за машиностроенето с оглед установяване на текущо състояние на вграждани в машинни конструкции елементи, уточняване на технологични процедури за производство и др. За целта се използват научно обосновани методи с доказана зависимост на изследваното свойство и измервана физическа величина [1-9]. Налице е голямо разнообразие в прилаганите методи в зависимост от специфичните параметри на изследваните образци, зони на изследване, налична материална база, ресурси и др. Класически метод е акустическия (в т.ч. вибро-акустическия), като в съвременните научни изследвания все повече се използва и електро-магнитния метод при изследване на феромагнитни материали.

В научен проект на тема „Фазов състав, компромисни решения и идентификация на комплекс от свойства при реализиране на технологични режими на азотиране на топлоустойчиви стомани“ е предвидено да се изследва комплексът от потребителски свойства на топлоустойчиви стомани от комбинацията на технологични параметри при

реализиране на технологични режими на азотиране. Акцентира е на компромисната оптимизация между микротвърдост и относителна изнosoустойчивост, между микротвърдост, относителна изнosoустойчивост и фазов състав, а така също и тяхното идентифициране чрез магнито-шумови характеристики.

В настоящия доклад е представена ретроспекция на акустическия и електромагнитния безразрушителни методи и тяхното приложение за контрол на физико-механичните свойства на феромагнитни стомани. Акцент е поставен върху възможността за оценка на повърхностни свойства на стоманите.

ФИЗИЧЕСКА ОСНОВА ЗА КОНТРОЛ НА ЕЛАСТИЧНИ СВОЙСТВА

1. Вибро-акустически метод

Методът се основава на зависимостта на честотата на вибро-акустичния резонанс от геометрични размери и механични свойства на стоманата. Прилага се при изследване на образци с постоянно сечение.

Основната зависимост за теоретична обосновка на резонансна честота f_{1p} , приложима за прътови конструкции с постоянно сечение и свойства на материала е [1]:

$$(1) \quad f_{1p} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Тук k е коравина на вала, m - маса. Чрез тази зависимост се определя честотата f_{1p} на първия резонанс. Налице са и резонанси и с по-голяма честота. При наличие на отклонение в коравината в различни направления на образец вследствие на еластични и геометрични свойства, възникват и допълнителни междинни честотни пикове в резултат на сечението несиметрично сечение възникват междинни резонанси [2]. В този случай за разчитането на спектрограмата е необходимо да се използва моделиране чрез използване на инженерни методи, напр. методът на крайните елементи (FEA). За оценката на повърхностна твърдост на ограничена дълбочина следва да се зададе еластичните свойства на материала в зависимост от твърдостта, а така също предварително се провери чувствителността на виброакустичния метод за диагностика на конкретния образец [2-4].

2. Акустически метод

Еластичните свойства на металите се оценяват чрез измерване на акустически характеристики скорост на надлъжната c_l и на напречната c_t вълна, а така също и на плътността на материала ρ . Налице са следните зависимости между тях и модула на линейна деформация E и на усукване G :

$$(2) \quad c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}; \quad c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}; \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$

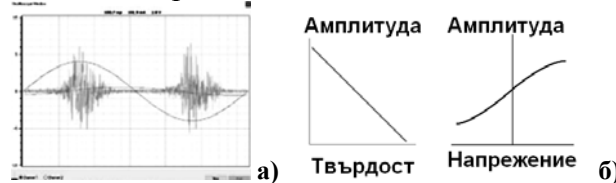
Тук ν е коефициент на Поансон. В тези зависимости се предполага, че изследвания материал е изотропен. Промяна на еластичните свойства в зони от материала в измерваното направление може само приблизително да се оцени поради наличие на значителен брой неизвестни по отношение на размери на зоните, характер на изменението на свойствата и др. Допълнителни трудности в реални условия създава изискването за високо точностна апаратура за измерване, [5].

3. Шум на Бархаузен

Промените в микроструктурите причиняват промени не само в механичните свойства, но и във вътрешните физични свойства като магнитна пропускливост и проводимост. За да се постигне целта на безразрушителното изпитване, много изследователи работят върху електромагнитни методи за изпитване на феромагнитни материали [6-9].

Анализирането на шума на Бархаузен е безразрушителен метод, основаващ се на възникването на шум във феромагнитни материали в резултат от прилагането на външно магнитно поле. Установени са две основни характеристики, които пряко оказват влияние върху интензивността на шума на Бархаузен: микроструктурата на образците, свързана с твърдостта на материала, а именно – интензивността на шума намалява с нарастване на твърдостта; наличие на напрегнатост на средата на образците, в т.ч. и разпределение на напрежението.

На фиг. 1 с а) е показано изображение на сигнали, получени при измерване на шума на Бархаузен [6]. За безразрушителна оценка на материала регистрираните сигнали се подлагат на математическа обработка и се търси корелацията получените величини с измерени механични характеристики чрез стандартни методи. На фиг. 1 б) са показани и принципни зависимости между интензивността на шума от твърдостта и напрежението на изследваните образци



Фиг. 1. Изображение на сигнали от шум на Бархаузен (а) и принципни зависимости между интензивността на шума от твърдостта и напрежението на материала (б).

Изследванията в [8] показват, че формата на сигнала от шума на Бархаузен силно зависи от силата на максималния ток, разстоянието между полюсите за възбуждане на електромагнитното поле, от честотата на магнитното поле. Честотната характеристика и чувствителността на намотките оказват влияние върху дълбочината на регистрация на сигнали от шума. Допълнително влияние оказва геометричната форма на контролираните образци поради промяна на разпределението и проникването на магнитното поле. За провеждането на едно измерване е необходимо да се проведе оптимизационна процедура на настройката на апаратурата.

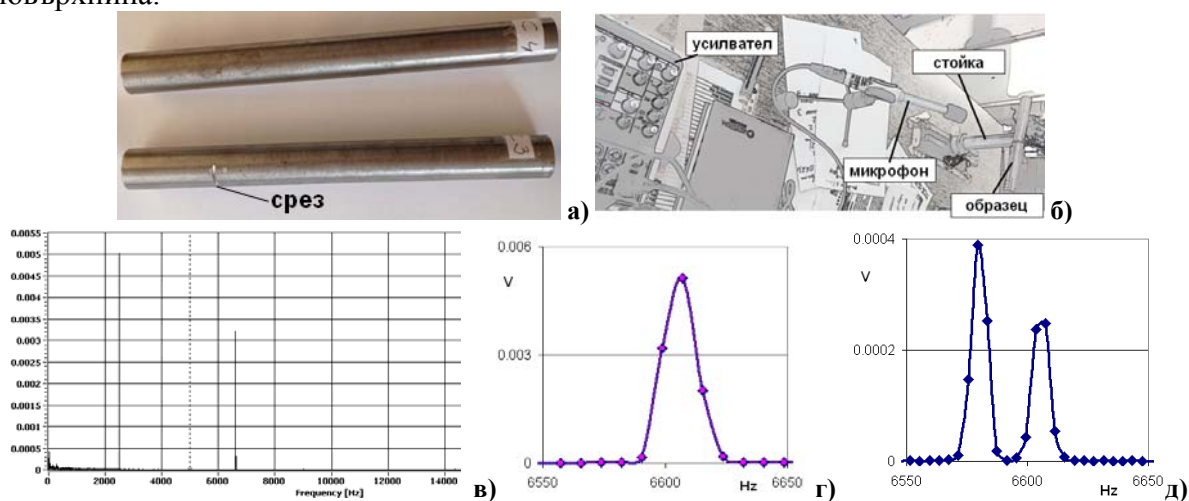
Тъй като при промишлено приложение на метода е удачно прилагане на повърхностно намагнитване на участък от детайлите, в съвременното машиностроене методът намира приложение при контрол на свойства след: студена обработка на метала (например накатяване, лазерна обработка); повърхностно закаляване (от вида цементация, азотиране, индукционно закаляване); механична обработка (шлайфане, струговане, фрезование). Налице са възможности и за изследване на динамични процеси, протичащи в метала, като пластична деформация, умора, напрегнато състояние. Специализираната индустрия предлага ръчни или полуавтоматични измервателни устройства, профилирани сензори, софтуер за анализиране на измерените данни [6].

БЕЗРАЗРУШИТЕЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕЛАСТИЧНИ СВОЙСТВА

1. Изследване чрез вибро-акустически метод

Обект на изследване са два цилиндрични образци с диаметър 18 mm и дължина 180 mm (фиг. 2 а), като на единия (С3) е нарушена симетричността чрез срез с дълбочина 1.5 mm на разстояние 40 mm от края му. Чрез апаратура за вибро-акустично изследване (фиг. 2 б), състояща се от микрофон, усилвател и компютър, са регистрирани в цифров вид честотните спектри на образците в диапазона 20 – 20000 Hz. За целта всеки образец е окачван на нишка върху стойка и върху него е прилагано динамично въздействие. На фиг. 2 в) е показан типичен резултат от едно изследване, а на фиг. 2 г) и д) увеличени участъци в областта на втория резонанс за образец с пълна симетрия и без симетрия на кръглото сечение. При вместо един пик в областта на резонанса възникват два пика. При наличие на подходящо изработени образци по

аналогия на данните в [2] по разстоянието между пиковете е удачно да се оцени разлика в еластичните свойства на повърхностно обработена и необработена повърхнина.



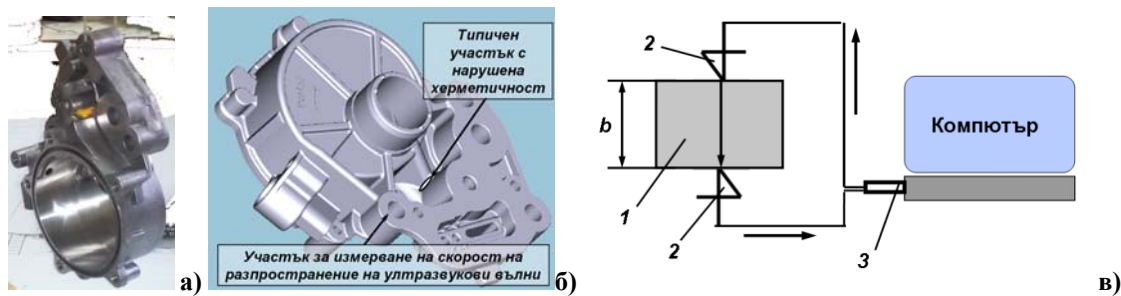
Фиг. 2. Вибро-акустично изследване на цилиндрични образци; а) – изследвани образци; б) – опитна уредба; в) типичен резултат от изследването; г) образец без срез; д) образец със срез.

За първия и втория резонанс са получени честотите 2499 и 6607 Hz. За плътността на материала е измерена стойността $\rho = 7732 \text{ kg/m}^3$. След моделиране на образците като 3D обекти чрез FEA е получен модул на линейна деформация $E = 2.087 \cdot 10^{11}$.

Направен е числен експеримент след моделиране на образца като съставна част (сглобена единица), състояща се от сърцевина и повърхностен слой с дебелина 0.1 mm на който са зададени различни еластични характеристики. Установена е незначителна разлика от 1 – 3 Hz, която е несъществена и се доближава до метрологичната точност на измерване.

2. Изследване чрез акустически метод

Обект на изследване са обработени алуминиеви отливки с доказани участъци с порестост на материала, получени в процеса на отливане. Образците не са подлагани на повърхностна обработка. Целта на изследването е да се определят реални еластични характеристики на образците, които да бъдат използвани за моделиране на вибро-акустичното поведение при наличие на локални нецялостности. Измерени са средната плътност на материала ρ , скоростта c_1 на надлъжната вълна при честота на ултразвуковата вълна 10 MHz в участък с удачна форма за осигуряване на условия за дефектоскопичност. За измерването е използван цифров дефектоскоп с разделителна способност за измерване на време 0.01 μs . Измерено е времето t за разпространение на вълната в участъка на изследване с дължина b , определен чрез микрометър с разделителна способност 1 μm . За измерването е използван цифров дефектоскоп с разделителна способност за измерване на време 0.01 μs . Скоростта е определена по зависимостта $c_1 = b/t$ [5].



Фиг. 3. Конструкция на изследван образец (а), типичен участък с нарушена херметичност (б) и схема на измерване на скоростта c_l (в), където 1 е образец, 2 – преобразуватели, 3 – дефектоскоп.

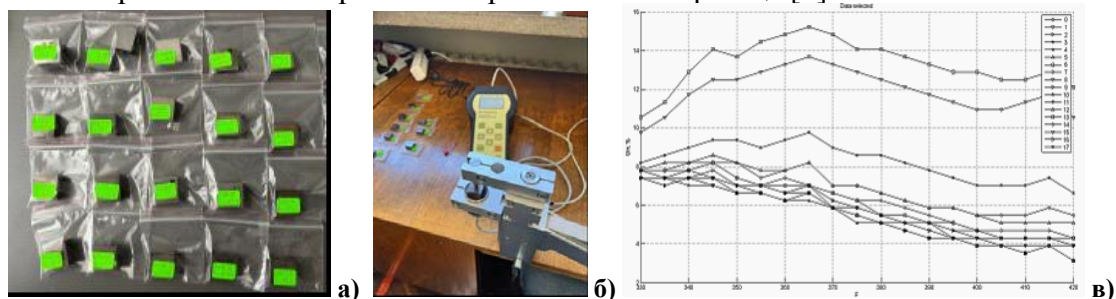
Изчислена е плътността на материала ρ за всеки образец. Установено е, че тя се намира в диапазона $\rho = 2740 \div 2796 \text{ kg/m}^3$ и скорост $c_l = 6341 \div 6367 \text{ m/s}$. За модулите на еластичност при линейна E и при ъглова G деформация по (2) са получени средни стойности $E = (7.58 \div 7.72) \cdot 10^{10} \text{ Pa}$ и $G = (2.86 \div 2.92) \cdot 10^{10} \text{ Pa}$ при коефициент на Поансон $\nu = 0.325$.

Механичните свойства на повърхността на металите могат да бъдат изследвани и чрез повърхностни вълни. За постигане на метрологична точност е необходимо осигуряване на значителна дължина на измервания участък и използване на специализирана ултразвукова апаратура.

3. Изследване чрез анализ на шума на Бархаузен

Обект на изследване са образци от топлоустойчива стомана ВН11 и ВН21 с повърхностна обработка йонно азотиране. Целта на изследването е създаване на методика за безразрушителен контрол на потребителските качества покритието, които може да се променят в зависимост от използваните конкретни режими за обработка. За оптимизиране на разходите за изследване геометричните размери на образците са минимизирани, а обработените повърхности са плоски и са шлифовани до един клас на грапавост.

Образците са създадени в две групи след моделиране на технологичния процес по отношение на температура на азотиране, налягане на газа, времето на азотиране и температурата на отвръщане преди азотиране по методика в [10]. Първата група е използвана за свойствата микротвърдост, относителна износоустойчивост, дебелина на повърхностния слой и фазов състав. Втората група от образците са използвани за измерване на шума на Бархаузен; те са показани на фиг. 4 а). Изследването е направено с помощта на апаратура „MULTITEST-MC010“ и клещи за регулиране на силата на натиск на измервателния сензор към повърхнината на образца [9].



Фиг. 4. Изследвани образци (а), апаратура за измерване на шума на Бархаузен (б) и резултати от едно изследване (в).

Първоначални резултати от проведено измерване на шума на Бархаузен в mV са показани на фиг. 4 в). Те са проведени без провеждане на оптимизационна процедура по отношение на режима на измерване с оглед постигане на максимална

чувствителност. Последователно е увеличаван токът на пренамагнитване и чрез паметта на апаратурата са получени експериментални криви между шумовото напрежение и силата на тока. Установява се е чувствително изменение на шума на Бархаузен за изследваните повърхностни покрития. Експерименталните криви се групират по форма въпреки съществуващото разсейване на данните. Това прави методът перспективен за идентифициране на свойства на готовите изделия, изготвени от йонно азотирани топлоустойчиви стомани ВН11 и ВН21. Предстои установяване на чувствителността на метода и възможността за безразрушително определяне на свойства на повърхността, от които зависят характеристиките микротвърдост, относителна износоустойчивост, дебелина на повърхностния слой и фазов състав.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работата е представена демонстрация на приложението на безразрушителите методи виброакустичен, акустичен и шум на Бархаузен за определяне на механични свойства на метали. За успешното реализиране на тези методи са необходими уредби с различна достъпност и опитни образци със специфични геометрични особености. За получаване на крайни достоверни решения е необходимо познаване на физическата зависимост между измерваната по безразрушителен метод стойност и търсената механична характеристика.

За образци от азотирани топлоустойчиви стомани с минимизирани размери приложението на вибро-акустическия и акустическия метод е свързано с трудности за осигуряване на достатъчна чувствителност за оценяване на фазов състав в повърхностния слой. За безразрушителна оценка на очакван комплекс от свойства на повърхността на тези стомани след азотиране е по-подходящо използване шума на Бархаузен.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] HARRIS'SHOCK ANDVIBRATION HANDBOOK. McGraw-Hill. ISBN 0-07-137081-1
- [2]. Коларов И. ДИАГНОСТИКА НА ПОВРЕДИ В МАШИНИИ ЕЛЕМЕНТИ ЧРЕЗ МОДАЛЕН АНАЛИЗ. Монография, София, 2015. ISBN 978-619-90083-4-8
- [3] Broch J. Mechanical Vibration and Shock Measurements. Brüel & Kjaer'. 1984. ISBN 87 8735534 5
- [4]. Volodymyr Mashchenko, Valentine Krivtsov, Volodymyr Kvasnikov, Volodymyr Drevetski DETERMINATION OF YOUNG'S DYNAMIC MODULUS OF POLYMER MATERIALS BY RESONANCE VIBRATING-REED METHOD. IAPGOS, 4/2019, 34–37, p-ISSN 2083-0157, e-ISSN 2391-6761
- [5] Миховски М. Комплексно използване на безразрушителните методи за изследване на структурата и физикомеханичните свойства на метални материали. Дисертация за присъждане на научната степен „доктор на техническите науки”, Институт по механика и биомеханика – БАН, София, 1991.
- [6] BARKHAUSEN NOISE ANALYSIS. Non-destructive (NDT) measurement solutions for grinding burn and heat treat defect testing. Stresstech. Finland.
- [7] G MANSON G., G HOFFMANN. The frequency spectrum of Barkhausen noise. J. Phys. D : Appl. Phys., Vol. 5, 1972. Printed in Great Britain. 1972.
- [8] Vaidhianathasamy M. Important Factors Influencing the Magnetic Barkhausen Noise Profile. IEEE Transactions on Magnetics April 2016.
- [9] ВЕЛЕВ Б., ИВАНОВ И., БАНОВ К. Изследване на феромагнитни материали с методите на магнитоакустичната емисия и магнитния шум. International Journal “NDT Days” Volume 1, Issue 4, Year 2018. ISSN: 2603-4018

[10] Tontchev N., Materials science, Effective solutions and technological variants, - Lambert, Academic Publishing, 2014.

Благодарности: *Работата е създадена при разработване на научноизследователски проект «Фазов състав, компромисни решения и идентификация на комплекс от свойства при реализиране на технологични режими на азотиране на топлоустойчиви стомани», подкрепен от ВТУ „Тодор Каблешков” и финансиран по наредба на МО от 16.09.2016 г .*

ELASTIC PROPERTIES EVALUATION OF METALS BY NON-DESTRUCTIVE METHODS. APPLICATION.

Ivan Kolarov
ikolarov@vtu.bg

***Todor Kableshkov University of Transport
Sofia, 158 Geo Milev Str.
THE REPUBLIC OF BULGARIA***

Key words: *Non-destructive evaluation of elastic properties of metals*

Abstract: *Analysis of often used non-destructive methods for assessing elastic properties of metals and requirements to samples tested to obtain reliable data is done at work. Emphasis is placed on the requirements that the tested samples should meet in terms of geometric dimensions, uniformity of the structure and typical reasons for the occurrence of methodological errors. The following methods were considered: vibro-acoustic, ultrasonic and Barhausen noise. Physical foundations of the methods to obtain are described and experimental data are obtained.*

The paper is created in the framework of scientific project dedicated to the study of mechanical properties of heat-resistant steels with additional chemical-thermal treatment and will serve as justification for choosing a non-destructive method according to the existing samples for the scientific study.