

ВИБРОАКУСТИЧНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА АЛУМИНИЕВИ ДЕТАЙЛИ

Иван Коларов¹, Добрин Добрев²
ikolarov@vtu.bg, dobrin.n.dobrev@gmail.com

¹ВТУ «Тодор Каблешков», София, ул. «Гео Милев» № 158
²Технически университет – София, бул. "Кл. Охридски" № 8
BULGARIA

Ключови думи: модули на еластичност, плътност, резонансни честоти, възможност за регистриране на нецялостности

Резюме: Задача на настоящата работа е да направи сравнително изследване на модулите на еластичност, плътност и резонансни честоти на алуминиев образец (отлят корпусен детайл за производство на помпи) с характерен дефект с оглед създаване на модел за виброакустична диагностика. За провеждане на изследването е използван 3D модел на образеца и са проведени експерименти с детайли с доказано техническо състояние: без дефект и с типични дефекти, установени и маркирани след проверка на херметичност.

Чрез измерване на акустически характеристики и плътност са определени модулите на еластичност по добре установени класически зависимости. Чрез тях и с помощта на специализиран софтуерен продукт са изчислени теоретичните стойности на собствените честоти на модела.

Проведено е виброакустично измерване на резонансните честоти на образците и данните са сравнени с теоретичните резултати. Направен е статистически анализ на измерванията. Получено е разсейване на резултатите за един образец, съпоставимо с това на точността на дискретизация на честотата при измерване. Установена е промяна на някои резонансни честоти вследствие наличието на типична нецялостност. Те се различават значително от резултатите, получени за детайл без дефект и могат да бъдат регистрирани в рамките на изследване на образци от една производствена серия.

Получените резултати ще бъдат използвани за обосновка и създаване на виброакустичен модел за оценка на техническото състояние преди монтаж на корпусния детайл.

УВОД

Типични нецялостности в алуминиевите отливки са несвързани участъци, дължащи се основно на технологични отклонения в процеса на тяхното отливане [1]. Често пъти тези нецялостности са замаскират и не винаги са забележими при външен оглед. За изделия с изисквания за херметичност такива нецялостности в детайлите предизвикват нарушаване на работоспособността на целия механизъм. Това е възможно да се установи дори и след известен период на експлоатация от потребителя. За детайли

със сложна форма нецялостностите може да имат различно разположение и тяхната регистрация изисква значителни ресурси.

Виброакустичният метод позволява бърза регистрация на обемни и повърхностни нецялостности в серии от детайли с неголяма сложност. Обикновено диагностиката се реализира чрез анализ на една или повече лесно установими резонансни честоти. В просто еластично тяло възниква комплекс от резонансни честоти в зависимост от деформационните моди, а именно: огъващи, усукващи, надлъжни; като те могат да бъдат от различен порядък. Основната зависимост за теоретична обосновка на резонансна честота f е [2]:

$$(1) \quad f = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{c}{m}},$$

като са налице нейни производни. Тук c и m са коравина и маса на тялото, $\pi = 3.14$.

Детайли, създадени от повече геометрични примитиви, напр. отливки, се диагностицират значително по-трудно. Резонансните честоти успешно се определят след подробно описание на формата, задаване на механични свойства и динамично анализиране с помощта на инженерни софтуерни продукти. Те осигуряват бързо моделиране на възможни технически отклонения и отчитане на фактори на разсейването, напр. на структурни изменения, улесняват създаването на технологии за диагностика [3]. За целта детайлите се разделят на достатъчно малки участъци (елементи), така че при използването на установени математически алгоритми да се получи добра сходимост на резултатите [4].

Съществува тясна връзка между еластични и акустически характеристики на една еластична среда:

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

Тук c_l, c_t , са скоростите на надлъжната и напречните вълни, ν е коефициент на Поансон, а E и G - модул на линейна деформация и на усукване. Еластичната среда на реални изделия се характеризира със структурна анизотропия. Тя зависи от технологичните особености за производство и нейното охарактеризиране изисква специализирано оборудване [5].

Задача на настоящата работа е да направи сравнително изследване на модулите на еластичност, плътност и резонансни честоти на алуминиев образец (отлят корпусен детайл за производство на помпи) с характерни дефекти с оглед създаване на модел за виброакустична диагностика на дефектите.

РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО

Обектът на изследване е показан на фиг. 1 а). Той е 3D формиран от конструктора за нуждите както на документацията, така и за и технологичната екипировка. Създаденият модел е софтуерно транслиран в подходящ формат и използван в настоящето изследване за теоретично определяне на собствените честоти, а така също и на плътността на материала на отливките.

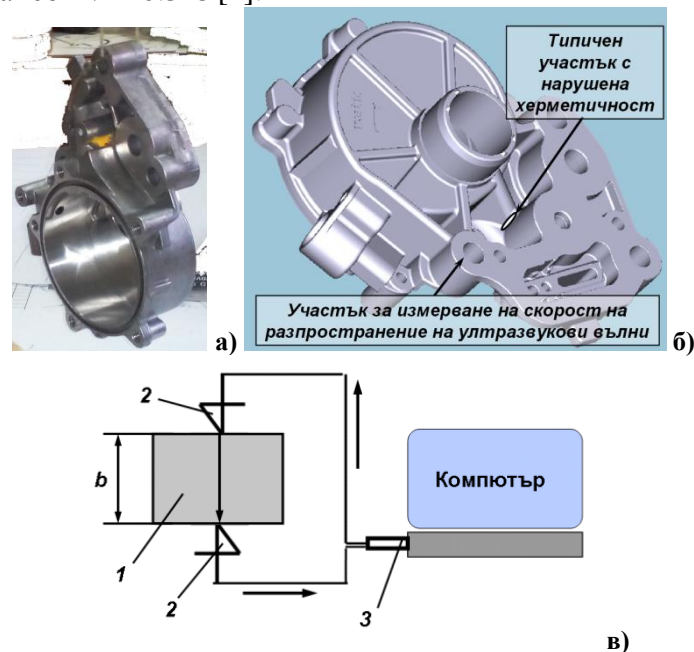
Изследвани са образци без установени нарушения на херметичност, представители на две различни производствени серии (серия I е представена от 4 образци – ОК1, ОК2, ОК3 и ОК4; и II серия, представена от образците ОК5 и ОК6) и такива с дефекти, установени чрез проверка на херметичност преди монтаж на

изделието. Дефектите са маркирани с оцветител. Предварително чрез химически анализ е установено, че са налице количествени разлики в някои съставляващи сплава материали в рамките на 1-2%. От избраната група бракувани образци най-често местоположение на дефекта е показано на фиг. 1 б). На същата фигура е показан участъкът с две срещуположно разположени плоски успоредни стени, в който е установена възможност за провеждане на ултразвукови безразрушителни изследвания на алуминиевата сплав.

Измерена е скоростта c_l на разпространение на ултразвуковата надлъжна вълна с честота 10 MHz в участък с удачна форма, обозначен на фиг. 1 б). Схема на измерване е показана на фиг. 1 в). Тук с 1 е означен изследваният участък на образеца, с 2 – ултразвукови преобразуватели, с 3 – цифров дефектоскоп с разделителна способност за измерване на време $0.01 \mu s$. Измерено е времето t за разпространение на вълната в участъка на изследване с дължина b , определен чрез микрометър с разделителна способност $1 \mu m$. Скоростта е определена по зависимостта [5]:

$$(3) \quad c_l = \frac{b}{t}.$$

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 $\nu = 0.325$ [4].



Фиг. 1. Конструкция на изследвания образец (а), типичен участък с нарушена херметичност (б) и схема на измерване на скоростта на надлъжната вълна (в).

Получените резултати за акустико-еластичните свойства за изследваните образци са показани в табл. 1. Не е установена съществена разлика между характеристиките, получени за образците в рамките на една серия (I и II) без дефект. Установена е значителна разлика в масите на тези серии и по-незначителни стойности за еластичните модули. Резултатите за серия II са много близки до получените за

негодните образци 1Д, 2Д и 3Д и следователно не могат да послужат за признак за окачествяване на техническото състояние.

За сравнение с получените резултати в табл. 1 са показани резултати за характеристики на типични алуминиеви сплави [4]. Забелязва се, че получените резултати от изследваните образци са близки по стойност характеристики до широко използвани в практиката сплави.

Табл. 1. Описание на опитните образци.

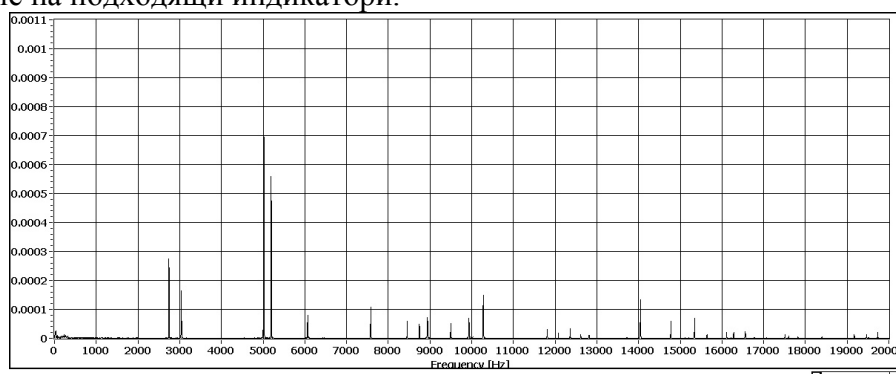
Образец №	Експериментални резултати					Теоретични резултати	
	Образци без дефект		Образци с установен дефект			Al 2024	Al 5454
	ОК 2 Серия I	ОК 6 Серия II	1Д	2Д	3Д		
$\rho, \frac{m}{kg^3}$	2738	2801	2796	2806	2801	2800	2690
E. 10^4 , MPa	7.56	7.73	7.72	7.74	7.73	7.3	7.0
G. 10^4 , MPa	2.85	2.92	2.91	2.92	2.92	2.8	3.05

С помощта на 3D модела са изчислени собствените честоти на образца с входни данни, определени за ОК 2 (описани по-нататък като Al 1) и за сплави Al 2024 и Al 5454 [4]. Проведен е предварителен анализ на сходимостта на резултатите за собствените честоти и е установено, че при избраните характеристики се постига отклонение на резултатите в рамките на 0.1 – 1 Hz за собствените честоти в диапазона до 10 kHz и в рамките на 2 – 9 Hz при изчисляване на честотите в диапазона 10 - 20 kHz. Теоретично са установени 42 резонансни честоти в диапазона до 20 kHz. Получени са и деформациите при съответните моди, но те могат да бъдат потвърдени с високочестотна оптична апаратура.

Измерени са резонансните честоти на образци от изследвания детайл в честотния диапазон до 20 kHz чрез еднократно импулсно възбуждане посредством подходящ обект. За целта всеки образец е окачван на идеално гъвкава и неразтеглива нишка. Излъченият фон е записан в цифров вид чрез акустическа апаратура с вграден 16 bit USB хардуер. Получен е спектърът с помощта на специализиран софтуер. Проведени са серия изпитания с образците от табл. 1 и е установено разсейване на измерените резонансни честоти в рамките на 4 Hz (или в някои случаи $\pm 2 \div \pm 3$ Hz), което е съпоставимо с разсейването на измервателната апаратура [2]. Експериментално са установени 37 резонансни честоти, като е възможно не всички да бъдат регистрирани чрез един експеримент. Многократните наблюдения показват, че до честотите с № до 6 се регистрират винаги в рамките на едно изпитание. С нарастване на номера на честотата се увеличава вероятността тя да не бъде регистрирана. Опитът показва, че прилагането на импулс с малка интензивност увеличава броя на регистрираните резонансни честоти в широк честотен диапазон. Типичен резултат от изследване на честотния спектър е показан на фиг. 2.

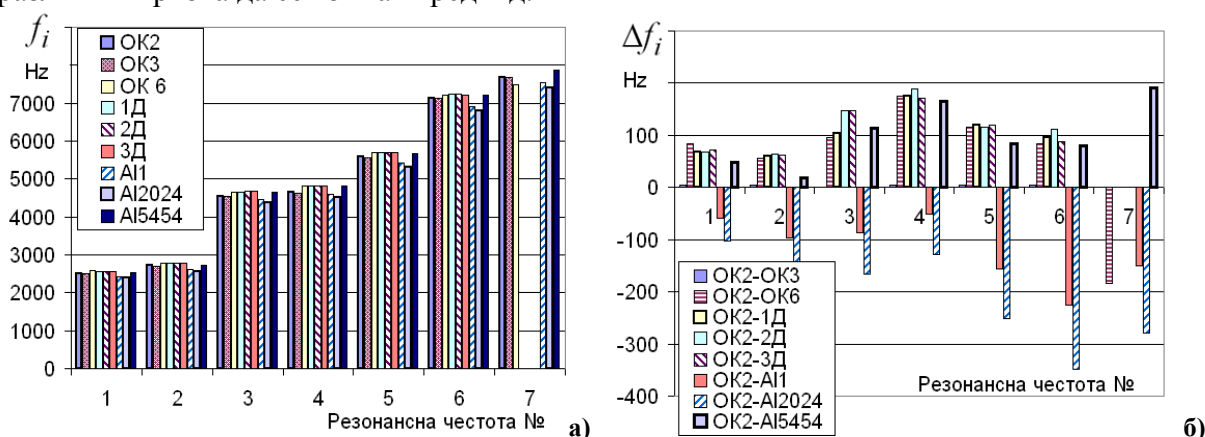
Направено е сравнение между първите седем измерени резонансните честоти f_i за образците от табл. 1 и теоретичните честоти, получени за сплави Al 2024 и Al 5454, а така също и сплав с характеристики, изчислени за образците без дефект от серия I. Резултатите са показани на фиг. 3 а). Тук с означението Al 1 са показани теоретичните честоти f_i , получени с характеристиките чрез безразрушително изследване на образец без дефект от серия I. Налице е групиране на честотите, но за нуждите на

диагностиката на относително малки нецялостности е необходимо тяхното сравнение за създаване на подходящи индикатори.



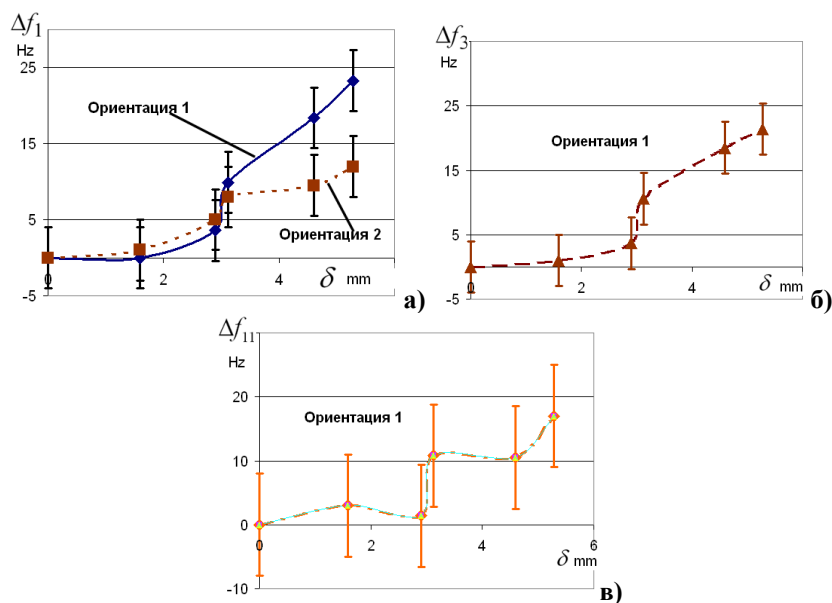
Фиг. 2. Типичен резултат от изследване на честотния спектър на един образец.

На фиг. 3 б) е показана честотната разлика Δf_i между честотите f_{OK2} за образец без дефект от серия I ОК2 и f_i за образец ОК3 от същата серия, както и за другите образци от табл. 1, т.е. $\Delta f_i = f_{OK2} - f_i$; индикация за сравняваните образци е показана в легендата. Налице е разпознаваемост на образците без дефект от използваните серии. Докато честотните разлики за образци от една серия са в рамките на 4 Hz, то тези за образци от различните серии е в рамките на ± 180 Hz за изследваните честоти. Подобна е честотната разлика, получена чрез експерименталните данни за образците 1Д-3Д, а така също и чрез теоретичните стойности на използваните алуминиеви сплави. Следователно структурните изменения на сплавта са основната причина за тези разлики и трябва да се взимат предвид.



Фиг. 3. Резултати за резонансните честоти f_i (а) и за честотната разлика Δf_i (б) за образците, описани в табл. 1.

В 3D модела са формирани серия от нецялостности с нарастваща дълбочина δ и с ориентация 1, съвпадаща с направлението на оребрениято (радиално на отвора) и в перпендикулярно направление – ориентация 2. Изчисленията са направени за алуминиева сплав с характеристики, описани в табл. 1 за образец от серия I. Получени са стойностите f_i и $\Delta f_i = f_{AI1} - f_i$, с индекса AI 1 се отнасят за теоретичните честоти за използваната сплав. На фиг. 4 са показани теоретични резултати за изменението на резонансни честоти Δf_i с номера 1, 3 и 11. Отчетено е количествено изменение на Δf_i в резултат на наличието на нецялостност в сравнение с разсейването на честотите за една серия образци.



Фиг. 4. Резултати за изменението на Δf_1 , Δf_3 и Δf_{11} в зависимост от дълбочината δ на нецялостност.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В резултат на получените резултати могат да бъдат направени следните изводи:

- Структурните изменения на сплавта за отливане на образците са основна причина за промяна на резонансните им честоти и трябва да се взимат предвид при вибродиагностиката. Тези структурни изменения се регистрират по-трудно с традиционния ултразвуков метод.
- Налице е съпоставимост между теоретични и експериментални резултати за резонансните честоти. Основен проблем при сравняването на честотите от по-висок характер е идентификацията (определяне на условия номер) на експерименталните данни и са възможни грешки от субективен характер.
- Наличието на нецялостност, в т.ч. и нейната ориентация, предизвиква изменение на някои резонансни честоти. Това изменение е значително и е възможно да бъде регистрирано.
- Разсейването на резонансните честоти на образци от една производствена серия е съпоставимо с това на апаратурата за идентификация на тези честоти. Следователно вибро-акустична идентификация на нецялостности в сплавта е възможно да бъде приложена за образци от една серия.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] The Aluminum Automotive Manual. European Aluminium Association. Version 2002.
- [2] Harris' shock and vibration handbook. Allan G. Piersol, editor.—5th ed. McGRAW-HILL. 2002. ISBN 0-07-137081-1.
- [3] Коларов И. Диагностика на повреди в машинни елементи чрез модален анализ. Стр. 138, София, 2015 г. ISBN 978-619-90083-4-8.
- [4] NX Nastran. Basic Dynamic Analysis User's Guide. Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. 2008.
- [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.

VIBRO-ACOUSTIC STUDY OF ALUMINUM CASTS

Ivan Kolarov¹, Dobrin Dobrev²
ikolarov@vtu.bg, dobrin.n.dobrev@gmail.com

¹*Todor Kableshkov Higher School of Transport, Sofia, «Geo Milev» Str. № 158*

²*Technical University of Sofia, 8, Kl. Ohridski Blvd.
BULGARIA*

Key words: *Elasticity modules, density, resonance frequencies, possibility to register discontinuities*

Abstract: *The aim of this work is to present a study of the elasticity, density and resonance frequencies of an aluminum sample (cast hull for pump production) with typical defects in order to create a model for vibroacoustic diagnostics of the defects.*

A 3D model of the specimen was used to carry out the study and experiments with details of the proven technical condition (no defects and with defects, established and marked after leakage checking) were carried out.

The elasticity modules are defined by well-established classical dependencies by measured acoustic characteristics and density. The theoretical values of the model's own frequencies are calculated using a specialized software. Vibroacoustic measurement of resonant frequencies is carried out and the data are compared to the theoretical results. Statistical analysis of measurements is done. Scattering the results for one sample, comparable to the precision of sampling frequency measurement, is obtained. A change in some resonant frequencies due to the presence of a typical imperfection is established.

The results obtained will be used to justify and create a vibroacoustic model for assessing the technical condition before mounting the housing.