

ВИБРОАКУСТИЧНО ИЗЛЕДВАНЕ НА ЛОКАЛНА ПОРЕСТОСТ В ОТЛИВКИ

Иван Коларов
ikolarov@vtu.bg

**ВТУ "Тодор Каблешков",
ул. "Гео Милев" № 158, София
БЪЛГАРИЯ**

***Ключови думи:** Виброа-акустична диагностика на локални порести зони в отлети от алуминиева сплав машинни елементи*

***Резюме:** Проблемът с вътрешни и замаскирани нецялостности в алуминиевите отливки е актуален и е една от причините за намаляване на ресурса на готовите изделия. Концентрацията на пори в малък участък от отливката е причина за незначително изменение на нейното тегло. По предварителни изчисления, промяната на теглото е по-малко от 1 g и трудно се регистрира. В процеса на изследване на алуминиеви детайли с доказани нарушения на херметичност са регистрирани са вибро-акустични отклонения, които не се обясняват с наличието на вътрешни нецялостности. Цел на настоящата работа е да се проведе вибро-акустично изследване на алуминиева отливка с наличие на порести локални участъци.*

Целта на работата се постига чрез разделяне на 3D модел на изследван образец в САD среда като сглобена единица, съставена от две части: основна конструкция и участък с доказани случаи на често регистрирани вътрешни пукнатини. За всяка съставна част на детайла се задават еластични характеристики съобразно търсеното решение. Получени са резонансните честоти на модела с частична порестост и еластични характеристики на средата, определени от други автори. Получените теоретични резултати са сравнени с експериментални данни от вибро-акустично изследване на образци на модела с доказани течове в критичния участък и с еднаква маса, определена с разделителна способност 1 g на теглилката. Получено е принципно съвпадение на теоретични и експериментални резултати.

На база на получените резултати е установена по-добра разпознаваемост на изследваната пореста зона в сравнение с използване на тегловния метод.

УВОД

При отливане на детайли от алуминиеви сплави често пъти възникват пори (малки кухини) в резултат на отделяне на газове в стопения материал. Порите са причина за промяна на някои експлоатационни характеристики, напр. еластични свойства, якост, нарушаване на херметичност. Формата и броят на порите зависи от размера на зърната на изходната субстанция за формиране на сплавта. Допълнително влияние на плътността на материала в локални области на един детайл оказват и

технологични характеристики при отливане, напр. времето за изстиване, формата и др. [1].

На проблема за определяне на механичните характеристики на пореста еластична среда, формирана чрез отливане, се регистрират значителен брой научни публикации. В основата си те представят линейна зависимост между модула на Юнг E и порестостта на материала p . Така например, в [2] за сплав с химически състав AlSi12 при увеличаване на p от 0 до 90% експериментално е установено, че модулет E_0 намалява линейно до $0.1E_0$.

В [3] е представено изследване на механични свойства на алуминиева сплав с плътност $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$ чрез метод на крайните елементи. За целта са използвани 2 и 3 D модели за описване на пореста еластична среда с плътност ρ_p до $0,216 \cdot \rho$, формирана от цилиндрични отвори с диаметър до 3 mm. Средата е натоварена в направление, перпендикулярно на оста на цилиндрите. Получена е експоненциална зависимост между модула E и порестостта p , която се доближава до отсечка. Проведени са експерименти с алуминиеви тела с изкуствени цилиндрични и равномерно подредени кухини с диаметър 2.5 и 3 mm. За тези диаметри плътността на материала е изчислена на $\rho_p = 0,27 \cdot \rho$, т.е. средната порестост на средата е $p=0.73$. Направено е сравнение с теоретичните данни за резултатите, получени чрез 3 D моделиране е установено отклонение на модула E от 6 -10% за един размер. Няма данни за еластичното поведение на средата при прилагане на натоварването в друго направление.

Механичните свойства на порести материали зависят не само от количеството, но и от формата на порите и от тяхното разположение спрямо основните натоварвания. В отливки условно в зависимост възможността порите видимо да се регистрират чрез наблюдение еластичната среда и се определят като с „микро” и с „макро” порестост [4]. Макропорестостта не е равномерно разпределена в цялата среда и може да предизвика значителна промяна на еластичните свойства и якост в локални зони. Това е причина за възникване на локални пластични деформации, създаване на пукнатини и загуба на обемна якост. За пореста среда модулет на еластичност E_p се определя от общата зависимост

$$E_p = E_0 \cdot \left(1 - \frac{p}{p_k}\right)^n \quad (1)$$

Тук p и p_k са порестост и критична порестост на средата, обикновено p_k се намира в диапазона от 0.37 до 0.97, E_0 - модул на Юнг за среда без пори, n - степенен показател, намиращ се за широк кръг порести материали в диапазона от 1 до 4. Конкретните стойности на p_k и n зависят от формата (цилиндрична, сферична, кубична, пресичащи се тела) и размерите на порите. За среда с еднаква порестост модулет E може да се променя до два пъти в зависимост от формата на порите. Така например, за еластична среда, формирана от застъпващи се твърди сферични тела, най-голяма промяна на модула се получава при стойности $p_k = 0.652$ и $n = 2,23$, което се потвърждава от експериментални данни. В резултат на подробни изчисления с FEA и експериментално изследване чрез 3D радиографична томография за отлети образци с пори е получено $p_k = 0.5$ при $n = 2,5$ [4].

Регистрацията на критични локални зони с порестост с безразрушителни методи е скъпа дейност и не винаги достатъчно успешна [5]. При алуминиеви сплави достатъчно малка порестост, напр. 2 - 3% може да доведе до значителна загуба на

якост. В [5] се дават емпирични зависимости за обема на газово отделяне във втечени метали при конкретни стойности на налягане, обем и температура на метала и др. Следователно може да се приеме, че порите в метала имат сравнително равномерно разпределение. Дефекти в детайлите като загуба на механична якост или на херметичност в критични участъци с минимална дебелина на стената се обясняват с намаляване на якостта на средата или чрез разрушаване на стените между порите, с което се променя техният характер и геометрична форма.

При всички експериментални резултати се регистрира значително разсейване на резултатите за модула E_p , което се обяснява с хаотичното разпределение на порите, разлика в размерите им и др.

Възможност за разпознаване на локална порестост в машинни елементи дава вибро-акустичния метод. Методът е стандартизиран (ASTM E-2001-08) и се основава на сравняването на спектрите, излъчвани от машинните елементи при тяхното динамично натоварване. Наличието на геометрични, масови и еластични отклонения свойства на елементите предизвиква промяна на спектъра, което се използва за индикатор за охарактеризиране на техническото състояние. Методът е сравнително евтин и дава възможност за кратко време да се тества 100% от продукцията.

Основната зависимост за теоретична обосновка на резонансна честота f е [6]

$$f = 2\pi \sqrt{\frac{k}{m}},$$

к е коравина на вала, m - маса. Тази зависимост с успех се използва за

изследване на прътови конструкции. Но за вибро-акустично анализиране на еластични среди със сравнително сложни конфигурации се използва методът на крайните елементи (FEA) [3, 4, 7].

За индустриално внедряване на технологията за вибро-акустична оценка на техническото състояние на детайли общите препоръки в [8, 9] са измерване на плътността на материала, на геометрични размери и вибро-акустично изследване на детайлите, т.е. това са необходими входящи характеристики за оценка на техническото състояние на детайлите. Също така е необходимо и убеждаване на потенциалните потребители на тази технология в нейната ефективност чрез изследване на образци от практиката при многофакторна оценка на образците с цел избягване на замаскиране на резултатите.

Налице е пряка връзка между големината на геометричното отклонение и изменението на резонансните честоти. Според изследванията в [10] резонансните честоти при геометрични отклонения на детайлите се променят нелинейно. Удачно е използване на малко променящите се честоти като реперни за оценка на детайли с допустими стойности на еластични характеристики на средата.

Задача на настоящата работа е да изследва вибро-акустичното поведение на еластична среда с локална порестост. Задачата е обектно ориентирана към отлят алуминиев детайл с доказани случаи за нарушаване на херметичност по време на качествен контрол, а така също и след натоварване от вибрации в процес на експлоатация.

ПОСТАНОВКА ЗА РЕШАВАНЕ НА ЗАДАЧАТА

Вибро-акустичната диагностика на машинни елементи се свързва с регистрация, сравняване и оценка на резонансни честоти на обектите. За целта е необходимо регистриране на честотен спектър на образец без технически отклонения. Резонансните честоти f_{0i} от този спектър се сравняват с честотите f_i на изследваните детайли; i е номер на резонанса. Изчислява се разликата $\Delta f_i = f_{0i} - f_i$ и в случай на $\Delta f_i > \Delta f_{\text{кр}}$ са

налице данни за техническо отклонение, $\Delta f_{iкр}$ е теоретически обоснована и експериментално доказана критична разлика на честотите за резонанс i [7]. Като обект за вибро-акустическа оценка се използва отлят от алуминий детайл със сравнително сложна конструкция [9, 10].

Задачата се решава при предпоставки, които чрез опростяване на входящите характеристики се дава възможност за достигане на крайно решение. За физико-механични свойства на средата предпоставките са: Еднородност на изходящата еластична среда по отношение на еластични свойства. Пренебрегва се наличието на достатъчно малка порестост, която не е причина за технически отклонения; Еднородност на порите по размери, форма и ориентация в порестата среда; Порестата среда се приема с характеристики $p_k = 0.5$ при $n = 2,5$. Тези стойности се използват за изчисляване на модула на Юнг E_p . Модулът на усукване G_p и коефициентът на Поансон ν_p за пореста среда се определят от

$$\nu_p = \nu_0 + \frac{p}{p_k}(\nu_\infty - \nu_0) \text{ и } G_p = \frac{E_p}{2.(\nu_p + 1)}, \quad (2)$$

като $\nu_\infty = 0,14$ при стойност на коефициента на Поансон за плътна среда $\nu_0 \approx 0,3$ и при $p_k \approx 0,5$. При теоретичното изследване стойността на p се променя в диапазона от 1 до 4%; Зоната с порестост се определя от геометричните особености на детайла. Приема се, че тя се формира около участъка за закрепване на детайла с резбови елемент към фундамента (виж фиг. 1 в) с радиус 16 mm, така че в нейната периферия са диагностично доказани нарушения на херметичността. Преходната зона между пореста и среда без пори се реализира в тясна гранична област; За теоретичното определянето на спектъра на детайла се използва 3D модел на проектанта, като не се отчитат възможни геометрични отклонения, допуснати от производителя в процеса на производство на матрицата; Еластичните свойства на средата при динамичното изследване на обектите се определя за алуминиева сплав Al 2024 при отчитане на плътността на материала и еластичните свойства от предишни изследвания [9, 10]. Теоретичната маса на моделите с порестост са показани в табл. 1.

Табл. 1. Маса на изследваните с порестост 3D модели

Порестост,%	0	1	2	3	4
Маса, g.	530.71	530.27	529.84	529.40	528.98

Табл. 2. Измерена маса на изследваните образци.

Образец	O1	O2	Д1	Д2	Д3	Д4	Д5
Маса, g.	532	531	530	532	531	531	532

Експерименталните образци са подбрани по маса и са селектирани при изпитване на херметичност по дефекти, доказващи порестост в критичен участък (фиг. 1 а). Измерената маса на детайлите е 531 g с отклонение до ± 1 g и тя е показана в табл. 2. Тук със символът O са означени детайлите без доказана порестост, а с Д – детайли с установено нарушение на херметичност. По външни белези порестостта е трудно установима поради затруднен достъп и необработена повърхнина. От описаните дефектни детайли се регистрира видимо една открита пора, тя е показана на фиг. 1 б). Направено е геометрично сравнение на образците и е установена разлика до 0.6 mm за някои габаритни размери.

За отлетия алуминиев детайл предпоставките за разпознаване на порестост са: Честотният спектър на детайли без теч се приема за образец, спрямо който се сравняват спектрите на детайли с нарушена херметичност; Пренебрегва се влиянието на

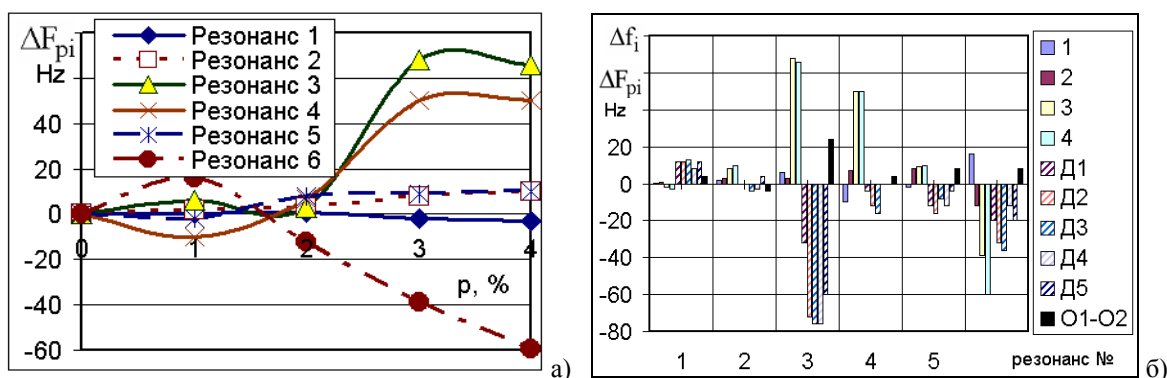
регистрирани отклонения на размери на детайлите, окончателно получени чрез стружкоотнемане; Не се отчитат съществуващи отклонения на еластичните свойства в детайлите. Тези отклонения се регистрират чрез ултразвуков безразрушителен метод чрез измерване на скоростите на разпространение на вълни в някои зони с възможност за провеждане на измерването и отклонението е по-малко от 1; Резонансните честоти се измерват с цифрова акустична апаратура с отклонение ± 2 Hz, описана в [7]. За намаляване на грешките в опорите изследваните образци са окачвани на идеално гъвкава и неразтеглива нишка, а динамичното възбуждане се реализира по импулсен метод.



Фиг. 1. Изображения на изследвания образец (а), на визуално регистрирана пора в зона с теч (б) и на модела с условно разглобена зона с порестост (в).

РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО

Създадените с порестост модели са изследвани динамично и са определени техните резонансни честоти F_{pi} и са сравнени с резултатите F_{0i} , i е номер на резонанса. Изчислена е разликата $\Delta F_{pi} = F_{0i} - F_{pi}$. Стойностите на ΔF_{pi} за резонансите до № 6 (които достъпно се регистрират съгласно [9]) са показани на фиг. 2 а). Налице е нелинейно и непоследователно изменение на резонансните честоти при увеличаване на порестостта p . Получените отклонения за резонанси с №№ 3, 4 и 6 са значителни (в рамките на 40 - 60 Hz) и е възможно да се регистрират експериментално. Значително по-малко е отклонението на резонанси с №№ 1, 2 и 5 (около 10 Hz) и то е по стойност близко до метрологичното разсейване при измерване на честотите (около 2 – 4 Hz).



Фиг. 2. Резултати за изменението на ΔF_{pi} (а) и сравнение между ΔF_{pi} и Δf_i (б).

На фиг. 2 б) са представено сравнение на ΔF_{pi} и Δf_i . Стойностите на Δf_i са получени при приемане честотите за образец O1 за еталон. За оценка на разсейването за образци, приети като „годни” тук са показани резултати, получени при сравняване на

честотите за O1 и O2. Разсейването на резонансните честоти за дефектните образци е значително по-голямо от разсейването, определено за годните т.е. възможно е те да бъдат разпознати чрез характеристиката Δf_1 . Налице е разлика в първия резонанс на дефектните образци и може да се дължи на незначителни отклонения в еластичната среда и в зоните с порестост, които изместват нелинейно и другите резонанси. Експерименталните данни по принцип потвърждават теоретичните резултати, а порестостта в дефектната зона се определя количествено в рамките на 2 – 3 %.

ИЗВОДИ

Наличието на локални зони с относително малки стойности на порестост успешно се регистрират чрез вибро-акустическо изследване. Постига се по-добра разпознаваемост на изследваната пореста зона в сравнение с използване на тегловния метод. Налице е принципно съгласуване на теоретични и експериментални резултати, а съществуващите минимални разлики се смята, че се дължат на незначителни отклонения в геометрични размери и еластични характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Cast alloys and products. The Aluminium Automotive Manual. Version. European Aluminium Association. 2002
- [2] M. Weber, J. Baumeister, J. Banhart and H.-D. Kunze. Selected mechanical and physical properties of metal foams. POWDER METALLURGY 1994
- [3] Max Lerner and Lilian P. Dávila. THE MECHANICAL PROPERTIES OF POROUS ALUMINUM USING FINITE ELEMENT METHOD SIMULATIONS AND COMPRESSION EXPERIMENTS. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1580 Materials Research Society, 2013.
- [4] RICHARD A. HARDIN and CHRISTOPH BECKERMANN Effect of Porosity on the Stiffness of Cast Steel. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2007.
- [5] Monroe R. Porosity in Castings. Paper 05-245, Page 1 of 28. American Foundry Society, Schaumburg, IL USA. 2005
- [6] Harris' shock and vibration handbook. Allan G. Piersol, editor.—5th ed. MCGRAW-HILL. 2002. ISBN 0-07-137081-1.
- [7] Коларов И. Диагностика на повреди в машинни елементи чрез модален анализ. Стр. 138, София, 2015 г. ISBN 978-619-90083-4-8.
- [8] Haoqi Li, Fei Ren. Resonant Ultrasound Spectroscopy Offers Unique Advantages as a Nondestructive Test Method. ADVANCED MATERIALS & PROCESSES • OCTOBER 2014.
- [9] Коларов И, Д. Добрев. ВИБРОАКУСТИЧНО РЕГИСТРИРАНЕ НА ТИПИЧНИ ДЕФЕКТИ В АЛУМИНИЕВ КОРПУСЕН ДЕТАЙЛ ЗА СГЛОБЯВАНЕ НА ПОМПИ. „NDT days 2017”/ „Дни на безразрушителния контрол 2017”, Созопол, 2017. (ISSN 1310-3946)
- [10] Коларов И. Вибро-акустична оценка на геометрични отклонения на отливки. Национална конференция „Акустика 2018“, Година XX, Брой 20, стр. 61-84, София, 2018. ISSN 1312-4897.

VIBROACOUSTICAL STUDY OF LOCAL POROSITY IN ALUMINUM CASTINGS

Ivan Kolarov
ikolarov@vtu.bg

*Todor Kableshkov Univercity of Transport,
Sofia, 158 Geo Milev Str.,
BULGARIA*

Key words: *Vibro-acoustical diagnostics of local porous zones in cast aluminum alloy machine parts.*

Abstract: *The problem with internal and masked incompleteness in aluminum castings is up to date and is one of the reasons for reducing the resource of products. The concentration of pores in a small part of the casting causes of a slight change in its weight and is difficult to register. In the process of testing aluminum details with proven leakage disturbances, vibro-acoustic deviations have been recorded, which are can not be explained by the existence of internal incompleteness.*

The aim of the present work is to perform a vibro-acoustic study of aluminum casting with porous local plots.

The purpose of the work is achieved by dividing a 3D model of a studied sample into a CAD environment as a assembled unit, consisting of two parts: a main structure and a section with proven cases of frequently registered internal cracks. For each part of the model, elastic features are set according to the solution sought.

The resonance frequencies of the model with porosity were calculated with partial porosity and elastic features of aluminum as determined by other authors. The obtained theoretical results were compared with experimental data from a vibro-acoustic study of samples with proven leakage in the critical part and of equal mass, measured with a resolution of 1 g of the weight.

The results obtained are used to explain the observed differences between the theoretical and experimental study of the vibro-acoustic behavior of the specimen.