

## МЕТОДИКА ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЕЛАСТИЧНИТЕ КОНСТАНТИ НА ОБРАЗЕЦ ОТ ПМ СТОМАНА ЗА ИЗПИТВАНЕ НА УМОРА ПРИ 20KHZ

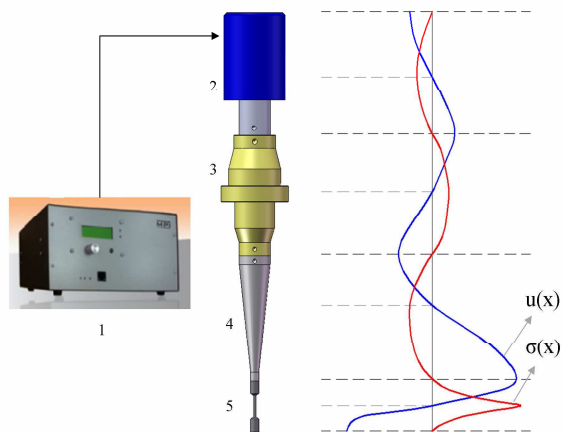
Диян М. Димитров, Борислав Костов, Калоян Костов

**Abstract.** In present article, elastic constants  $E, G, \nu$  of PM “dog bone” specimen sintered from pre-alloyed steel powder AstalloyCrL are experimentally determined using dynamic excitation method and FEM modeling, in order to analyze possibilities to use this specimen for ultrasonic fatigue test at 20kHz at push/pull mode. Results show slight anisotropy of Young’s modulus in different planes. Fundamental axial resonance frequency 22361Hz, higher than required is obtained. To adjust frequency additional machining of thinner part of the sample is needed. It seems that such specimen is not suitable for ultrasonic fatigue testing.

**Key words:** прахова металургия, синтерована стомана, динамичен модул на еластичност, собствени честоти, собствени форми, МКЕ, изпитване на умора, powder metallurgy, sintered steel, dynamic Young’s modulus, eigenfrequency, eigemode, FEM, fatigue testing

### 1. Въведение

С развитието на ултразвуковите технологии методиката за изпитване на умора при високи честоти се прилага все по-често, в последните години [1,2]. Схема на ултразвуков стенд за изпитване на умора, проектиран и реализиран в ТУ-Варна е показана на фиг.1



Фиг.1. Схема на стенд за ултразвуково изпитване на умора в лаборатория на катедра Техническа механика, ТУ-Варна

1-генератор; 2-пиезокерамичен преобразувател; 3-бустер; 4-сонотрод; 5-изпитван образец

Системата работи в резонансен режим. Образецът (5) трябва да бъде симетричен с дължина  $\lambda/2$ , така че първата надлъжна собствена форма да се възбужда при честота 20kHz, т.е размерите на образца зависят от еластичните константи на изпитвания материал ( $E, G, \nu$ ) [3].

Целта на настоящата публикация е, да опише методика за определяне на еластичните константи на ПМ образец за опън (БДС EN ISO2740) и провери възможностите за корекция на образца в съответствие с упоменатите изисквания с цел използването му за ултразвуково изпитване на умора.

В практиката на безразрушителните изпитвания са наложени различни методики за определяне на еластичните константи на материалите. Например чрез измерване скоростта на разпространение на звуковите вълни или определяне собствените честоти на трептене [4,5]. Получените еластични константи се наричат „динамични“. Една от възможните методики изисква импулсно възбуждане на първите собствени честоти на огъващи и усукващи трептения, като образца от изпитвания материал се разглежда като свободна греда. Такава методика е описана в серия стандарти, като например ASTM E1876-09 или БДС EN ISO 12680-1. Стандартите изискват изработване на пробни тела с правоъгълно или кръгло, напречно сечение за които са известни точни решения за собствените честоти и форми на трептене. Пробните тела се закрепват във възлите на съответната форма, така че да се възбуди желаната форма и се подтисне възбуждането на други. Това закрепване дава възможност да се сведе до минимум демпфирането в опорите и образца да се разглежда като свободна греда. Ако материалът е хомогенен еластичен и изотропен на макрониво, еластичните константи може да се определят като функция на собствените честоти, масата и

геометричните размери на образеца, например прилагайки следната процедура [6]:

-определят се честотите на първите форми на огъващи (напречни) и усукващи трептения;

-на база определените собствени честоти се определят модулите първоначални стойности на модулите  $E$  и  $G$

-последователно се задават стойности на коефициента на Поасон  $\nu$  докато бъде удоблетворена зависимост (1) с достатъчна точност.

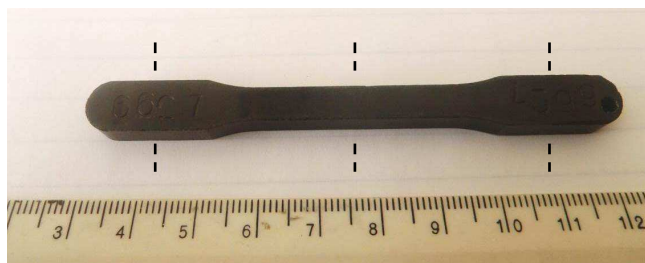
$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (1)$$

Необходимо е достатъчно прецизно експериментално определяне на собствените честоти и геометричните размери (дължина  $L$ , височина  $h$ ), тъй като 1% грешка при експерименталната стойност на собствената честота се мултиплицира при пресмятане модула на еластичност съответно в 2%, а при измерване на геометричните размери в 3%.

## 2. Методика на експеримента

### 2.1. Изследван образец

Изследваният образец е показан на фиг.2. Изработен е от прахова смес със състав  $Fe-1.5\%Cr+0.2\%Mo+0.3\%C$ , на база легиран прах AstalloyCrL производство на фирмата Hoganas AB-Швеция, по конвенционална ПМ технология (едностранно пресоване 600MPa, спичане при 1120°C за 40min в среда 90%N<sub>2</sub>+10%H<sub>2</sub>). Плътноста на образца след спичане измерена чрез архимедов метод е 6.83g/cm<sup>3</sup>.



Фиг.2. Общ вид на изследван образец БДС EN ISO2740

След спичане е проведена термообработка (нитроцементация 865°C, охлаждане в масло и нискотемпературно

отвърщане 180°C). Твърдостта на образецът след термообработката е 43HRC.

### 2.2. Подготовка на изследвания образец

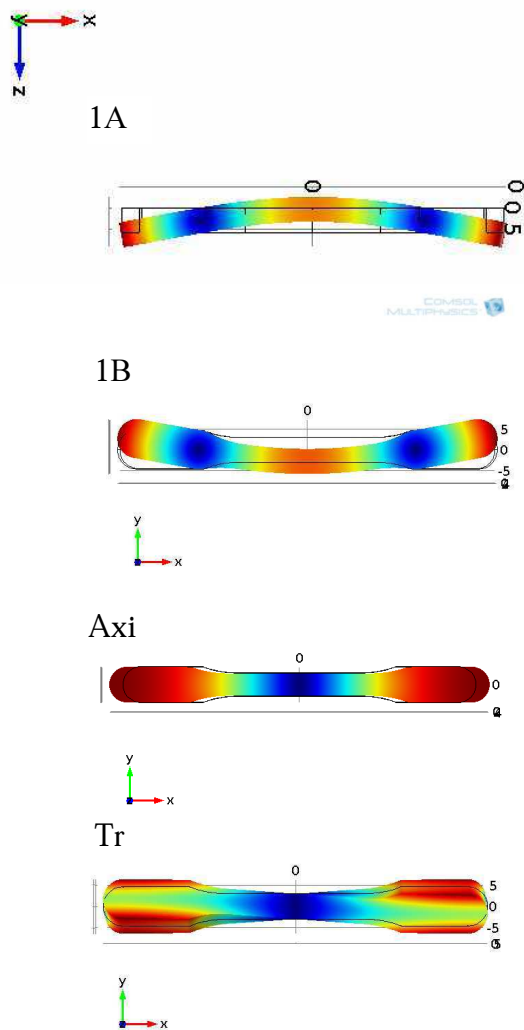
Размерите на образца са измерени по следната схема: –дебелина “ $h$ ” с цифров микрометър MITUTOYO с точност 0.001mm, в три напречни сечения (фиг.2); - ширина “ $b$ ” и дължина “ $L$ ” с шублер с точност 0.01mm. Масата е измерена с дигитална везна с точност 0.01g. По измерените размери и тегло е направен 3D модел на геометрията и пресметнат обема на образца. Изчислителната стойност на плътността е преметната чрез изравняване на масата на модела и реалния образец. Резултатите са показани в табл.1

Таблица 1  
Размери , тегло и плътност на геометричен модел на изследвания образец

$h_{cp}$ , mm	$L$ , mm	$V$ , mm <sup>3</sup>	$m$ , g	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>
5.777	90.07	3822	26.23	6864

### 2.3. Аналитично определяне на собствените честоти и форми (модален анализ)

Тъй като образецът представлява греда с променливо по ширина напречно сечение модалният анализ е проведен по МКЕ с помоща на Structural Mechanics Module на софтуерният пакет COMSOL MULTIPHYSICS 4.3a [7]. Генерирана е мрежа от тетрагонални крайни елементи. Изследвани са собствените форми на трептене за да се определи положението на възлите. Първите собствени форми на напречни, осови и усукващи трептения са показани на фиг.3. Не са задавани гранични условия т.е моделът е на свободна греда. При напречните собствени форми възлите се намират на разстояние 0.22L от краищата на образца. При надлъжната и усукващата форма възелът е в средата на образца. След получаването на собствените форми, чрез функцията „Parametric Sweep” е анализирано влиянието на еластичните константи на материала  $E$ ,  $G$  и  $\nu$  върху собствените честоти. Използвана е процедура описана в [8].



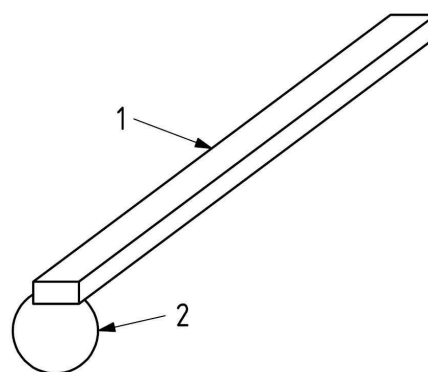
**Фиг.3. Собствени форми на напречни и надлъжни и усукващи трептения**

1A-напречна (успоредно на силата на пресоване); 1B – напречна (перпендикулярно на посоката на пресоване); Axi –надлъжна (аксиална); Tr- усукваща

#### 2.4.Схема на експерименталната установка

За експериментално определяне на собствените честоти е използвано импулсно възбуждане чрез удар. Началният импулс в образеца е въведен с помоща на изработен импулсен чук състоящ се от сфера от закалена стомана закрепена на гъвкав прът, фиг.4. Образецът е закрепен във възлите на съответната форма за да се намали до минимум влиянието на опорите и да се осигурят граничните условия за свободна греда, фиг.5. За записване на честотата на е използван кондензаторен микрофон с външна поляризация RFT.

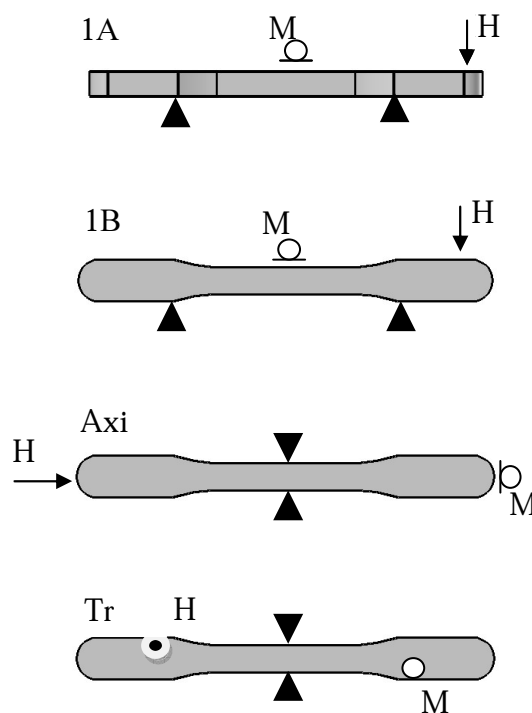
Сигналът от микрофона се усилва и се записва с помоща на дигитален осцилоскоп.



**Фиг.4 Схема на изработен импулсен чук [6]**

1-сфера от закалена стомана; 2-гъвкав прът

Оценката на честотите на свободните трептения е извършена като изходният  $X_i(t)$  сигнал е преобразуван от временната в честотната област, чрез бързото преобразуване на Фурие.



**Фиг.5. Схема на закрепване и възбуждане на изследваните честоти**

H- импулсен чук (посока на удар); M-микрофон

### 3. Резултати и анализ

#### 3.1. Експериментално определяне на собствени честоти

За всяка от описаните форми са направени по 4 измервания и резултата е усреднен. Измерените експериментални

собствени честоти са показани в табл.2. Разсейването на резултатите е под 1%, което гарантира пресмятането на еластичните константи с достатъчна точност [6].

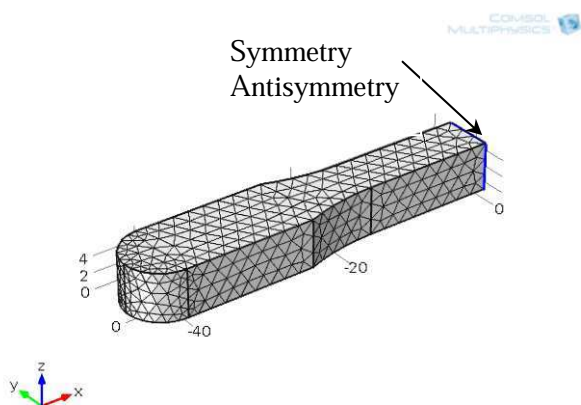
Табл. 2  
Експериментално определени собствени честоти на изследвания образец

Изм	f_1A [Hz]	f_1B [Hz]	f_Axi [Hz]	f_Tr [Hz]
1	3077	3216	22370	10649
2	3061	3221	22360	10660
3	3070	3205	22358	10647
4	3079	3213	22354	10649
<b>Ср.</b>	<b>3071,8</b>	<b>3213,8</b>	<b>22361</b>	<b>10651</b>

3.2. Определяне на еластичните константи по МКЕ

Изследване влиянието на гъстотата на мрежата

Последователно е генерирана мрежа от съответно 1196, 1849, 3487, 7376 крайни елемента. Изменението на честотите при максимално съгъстяване на мрежата е съответно 0.03, 0.05 и 0.01%, съответно за честоти f\_1A, f\_1B и f\_Axi и 1.91% за честотата на усукващата форма. Може да се каже, че гъстотата на мрежата крайни елементи практически влияе само на честотата на усукване (Tr). За понататъшните изчисления, с цел получаване на мрежа с достатъчен брой елементи и намаляване на изчислителното време, е използвана симетрията на геометрията и на формите.



Фиг.6. Мрежа крайни елементи - 4130 елемента

Анализите са направени върху половината от геометрията, като е зададено гранично

условие “Symmetry” за напречните и надлъжната форма и “Antisymmetry” за усукващата форма, фиг.6. Така разпределяме приблизително същия брой елементи върху половината геометрия и съгъстяваме мрежата приблизително два пъти.

Изследване на модула на еластичност E

Модулът на еластичност (E) е основната характеристика на материала оказваща влияние на собствените честоти на напречните и надлъжни форми. Първоначално за коефициента на Поасон е избрана стойност 0.28. Константите E и  $\nu$  са зададени като глобални параметри и чрез използване на функцията “Parametric sweep” се извършва сканиране в интервала на очакваните стойности, грубо със стъпка 1GPa и финно със стъпка 0.25GPa. Резултатите от финното сканиране са показани в табл.3.

Вижда се, табл.3, че честотата на напречната форма 1A отговаря на стойност на E=140GPa, докато честотите на форми 1B и Axi на модул E=142.5GPa. Честотата на усукващата форма е дадена за сравнение тъй като тя зависи основно от коефициента на Поасон [8].

Табл. 3  
Собствени честоти на напречни и надлъжна форми (Comsol) при промяна на E ( $\nu=0.28$ )

E, GPa ( $\nu=0.28$ )	f_1A [Hz] *(3071.8)	f_1B [Hz] (3213.8)	f_Axi [Hz] (22361)	f_Tr [Hz] (10651)
<b>140,00</b>	<b>3072,7</b>	<b>3184,6</b>	<b>22162</b>	<b>10575</b>
140,25	3075,4	3187,4	22182	10585
140,50	3078,2	3190,2	22202	10594
140,75	3080,9	3193,1	22222	10603
141,00	3083,7	3195,9	22241	10613
141,25	3086,4	3198,7	22261	10622
141,50	3089,1	3201,6	22281	10632
141,75	3091,9	3204,4	22300	10641
142,00	3094,6	3207,2	22320	10650
142,25	3097,3	3210,0	22340	10660
<b>142,50</b>	<b>3100,0</b>	<b>3212,9</b>	<b>22359</b>	<b>10669</b>
142,75	3102,7	3215,7	22379	10678
143,00	3105,5	3218,5	22399	10688

\*-експериментално определени честоти, табл.2

Изследване на коефициента на Поасон

у

Уточняване на коефициента на Поасон правим на база честотата на усукващата форма. Задаваме последователно стойности на модула на еластичност  $E=140\text{GPa}$  и  $E=142.5\text{GPa}$ , и сканираме  $\nu$  в интервала 0.20-0.35, грубо със стъпка 0.01 последвано от финно сканиране със стъпка 0.001. Резултатите са показани в табл.4.

Табл. 4  
Собствени честоти на усукваща форма (Comsol) при промяна на  $\nu$  ( $E=140, 142.5\text{GPa}$ )

$\nu$	E, GPa	f_Tr [Hz]	f_1A [Hz]	f_1B [Hz]	f_Axi [Hz]
0,26	140,0	10658	3072,7	3184,8	22163
0,261	140,0	10654	3072,7	3184,8	22163
<b>0,262</b>	<b>140,0</b>	<b>10649</b>	<b>3072,7</b>	<b>3184,8</b>	<b>22163</b>
0,263	140,0	10645	3072,7	3184,8	22163
0,264	140,0	10641	3072,7	3184,8	22162
0,265	140,0	10637	3072,7	3184,7	22162
0,28	142,5	10669	3100,0	3212,9	22359
0,281	142,5	10665	3100,0	3212,8	22359
0,282	142,5	10661	3100,0	3212,8	22359
0,283	142,5	10657	3100,0	3212,8	22359
0,284	142,5	10653	3100,0	3212,8	22359
<b>0,285</b>	<b>142,5</b>	<b>10649</b>	<b>3100,0</b>	<b>3212,8</b>	<b>22359</b>

Вижда се, че при модул  $E=140\text{GPa}$  отговарящ на честота 1A стойността на коефициента на Поасон при която честотата на усукване съвпада с експерименталната е  $\nu=0.262$ . При модул  $E=142.5\text{GPa}$  стойността е съответно  $\nu=0.285$ . Също така ясно се вижда, че тъй като образецът представлява стройна греда  $L/h= 18$ , първите честоти на напречните и надлъжни форми практически не зависят от коефициента  $\nu$ .

Резултатите показват анизотропия на свойствата в различните направления. Това е донякъде очаквано като се имат в предвид особеностите на ПМ технологията. В равнината XZ т.е успоредно на посоката на пресоване (форма 1A) е получен модул на еластичност  $E=140\text{GPa}$ . В перпендикулярната равнина XY и в надлъжно направление X модулът на еластичност е  $E=145.5\text{GPa}$ . Подобни резултати са получени от авторите в [5].

Анализ на възможностите за изработка на образец за изпитване на умора.

Поради анизотропията на свойствата на образецът, при проектирането на образец за ултразвуково изпитване на умора по схема опън/натиск трябва да се използва модулът на еластичност получен на база надлъжната собствена честота. Тъй като получената собствена честота на образца е 22359Hz (над 20kHz) изследвания образец трябва да се преработи.

Честотата на образец тип „дъмбел“ може да бъде намалена или като се увеличи дължината на образца или като се намали напречното сечение в тънката част [3]. Първото условие е практически неизпълнимо, а второто не е препоръчително поради проведената повърхностна термообработка.

**4. Заключение**

Изследваният образец показва анизотропно поведение в различните направления. При подготовка на образец за изпитване на умора по схема опън/натиск не трябва да се разчита на определените чрез напречната форма на трептене еластични константи, а да се определи честотата на осовата форма на трептене. При строен образец коефициента на Поасон не оказва съществено влияние на тази собствена честота.

Описаната методика може да се приложи при определяне на еластичните константи на различни материали при условие, че изследвания образец е гредови елемент.

Поради по-високата от изискваната осова собствена честота образецът не е подходящ за използване при ултразвуково изпитване на умора при 20kHz.

**5. Означения и съкращения**

- МКЕ –метод на крайните елементи
- ПМ – прахова металургия;
- E – модул на еластичност, GPa;
- G – модул на срязване, GPa;
- $\nu$  – коефициент на Поасон;
- $\rho$  – плътност,  $\text{kg/m}^3$ ;



## БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящото изследване е част от проект ДМУ03/98 тема: „Изследване якостта на нови синтеровани материали с приложение в автомобилната промишленост при циклично натоварване“ финансиран от Фонд „Научни изследвания“, България

## 7. Литература

- [1]. Stanzl S. Fatigue testing at ultrasonic frequencies. J Soc Environ Eng (1986), 25(1) pp11–6.
- [2]. Claude Bathias, Paul Croce Paris, Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice, Marcel Dekker, 2005 - 304 pages.
- [3]. Димитров Д.М., Михайлов В., Костов Б., Димитров Р., Моделиране на пробни образци за изпитване на умора при честота 20kHz, Научни известия на НТСМ (Дни на БК 2012), Година XX, Брой 1(133), Юни 2012, str.155-159, ISSN 1310-3946
- [4]. И.Н.Ермолов, Ю.В.Ланге, под ред. В.В.Клюева, Неразрушающий контроль, Справочник, Том 3, Москва, ашиностроение, 2004
- [5]. B. Kovachev, M. Mihovski, M. Stoytchev, M. Sulowski, Non-destructive Examination of Sintered AstaloyCrL and AstaloyCrM- Based Structural Steels, Archives of Metallurgy and Materials, Vol.52, Is. 1, 2007, pp. 96-104
- [6] ASTM E1876 - 09 Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration
- [7]. <http://www.comsol.com/>
- [8]. Wuchinich D., FEA-Assisted Measurement of Young's Modulus and Poisson's Constant in Stout Horn Blanks, UIA 32nd Symposium 2002, [www.modalmechanics.com](http://www.modalmechanics.com).

## За контакти:

9010 Варна, ул. “Студентска” 1  
Технически университет – Варна  
Катедра: Техническа Механика

гл.ас д-р инж. Диян Димитров,  
e-mail: [dimitrov.diyana@gmail.com](mailto:dimitrov.diyana@gmail.com)