



**ВИБРО-АКУСТИЧНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА МОДУЛА
НА ЕЛАСТИЧНОСТ НА 3D ПРИНТИРАНИ ОБРАЗЦИ.
АПРОБАЦИЯ НА МЕТОДИКА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ**

Иван Коларов

ikolarov@vtu.bg

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

Ключови думи: модул на линейна деформация на полимерни материали, принтирани при различни технологични режими

Резюме: Задача на настоящата работа е апробиране на методика за вибро-акустично определяне модула на линейна деформация на произведени чрез 3D принтиране полимерни образци. Образците са произведени за изследване на ударната жилавост на материала и имат квадратно сечение, като в средата е налице прорез. За провеждане на изследването е адаптирана е методика за определяне на модул на еластична деформация чрез вибро-акустичен метод. На база на втори закон на Нютон се установява, че за греди с постоянно сечение е налице аналитична зависимост между плътност на материал, модул на Юнг и резонансни честоти на гредите при възбуждане на огъващи моди. Но тя е неприложима за образци с друга форма. Затова са създадени емпирични зависимости между горните параметри чрез използване на метод на крайните елементи. Те са построени чрез изчисляване на резонансните честоти на 3D модел на принтираните образци за различни стойности на плътността и на модулите на линейна деформация.

Методиката е апробирана чрез изследване на осем стандартни образци принтирани от материала PET-G чрез дюза с диаметър 0.4 mm. Променяни са следните параметри: скорост, степен на запълване, стъпка на вертикално изместване на дюзата и на температура на материала при принтиране в препоръчителен от производителя на материала диапазон. Измерени са резонансните честоти на изследваните образци в диапазона до 20 kHz и са измерени техните маси с точност 5 mg. Като се има предвид обема на модела е изчислена плътността на материала за пробите. По построената емпирична зависимост са получени стойностите за модула на линейна деформация за всяка проба.

Установено е изменение на плътността на материала от 1132 до 1428 kg/m³, а на модула на линейна деформация – от 800 до 1965 MPa. Предстои провеждане на разрушителни изследвания за сравнение с получените данни.

Проведените изследвания дават основание да се смята, че използваната методика е приложима и за контрол на произведени чрез енергоспестяващи технологии машинни елементи.

ВЪВЕДЕНИЕ

Технологиите за производство на машинни елементи чрез 3D принтиране намират все по-голямо разпространение в съвременното машиностроене. За осигуряване на предвидими експлоатационни характеристики на принтираните елементи е от значение механичните свойства на материала в условията на експлоатация. Фирмите, производители на материали за захранване на 3D принтерите обикновено предоставят на своите клиенти данни за основни механични характеристики и препоръчителен диапазон на технологичните режими за изработване на елементите.

Модулът на линейна деформация E е една от основните механични характеристики, които охарактеризират поведението на машинните елементи при експлоатационни натоварвания. От практическа гледна точка интерес представлява възможността за реални изделия той да бъде контролиран безразрушително. Той се дефинира като комплексна характеристика E^* (използва се и терминът „динамичен модул“) във вида $E^* = E' + i \cdot E''$, като E' е реална част, еластична компонента, която описва коравината на материала, а E'' е част, описваща вискозността на материала, която е свързана с разсейване на механичната енергия чрез молекулярно движение [1, 2]. Между E' и E'' е налице отношението $\tan \delta = E''/E'$, където δ е фазовия ъгъл между тях.

Честотният диапазон на изследване в зависимост от използвания метод е от 0.1 до 40 (10 000) kHz [2], а използваните методи за възбуждане на вибрациите – хармонично или еднократно (в т.ч. ударно) [1, 2]. За целта могат да се използват широк кръг опитни уредби чрез измерване на ултразвукова проводимост, на вибрации чрез контактни или безконтактни осезатели или на звуково налягане в зависимост от съществуваща материална база и специфичните особености на изследванията.

Вибро-акустичния метод позволява провеждане на бързо комплексно изследване. Често пъти се изследват резонансните честоти, съответстващи на възбудените от динамично взаимодействие деформационни моди и които зависят от формата и механичните свойства на елементите. Методът се прилага основно при изследване на механични характеристики на полимерни материали [2, 3]. Чрез измерване на резонансни честоти f_{rj} се определя реалната част E' на модула E^* . Комплексната част E'' се определя чрез изчисляване на стойността $\tan \delta = \Delta f/f_r$, Δf е измерената широчина на спектъра на ниво $A_{\max}/\sqrt{2}$, A_{\max} - максимална амплитуда при резонансната честота f_r .

Задача на настоящата работа е разработка на методика за вибро-акустично изследване на механични характеристики на полимери и тестване на нейната валидност чрез определяне еластични свойства на създадени чрез 3D принтиране полимерни образци.

РАЗРАБОТВАНЕ НА МЕТОДИКА ЗА РЕШАВАНЕ НА ЗАДАЧАТА

Разработена е вибро-акустична методика за изследване на механични свойства на полимерни материали с цел определяне на механични свойства на принтирани опитни образци с размери 50x10x10 mm и със стандартна форма за оценка на ударна жилавост на материала. При изработката на образците са променяни следните параметри: скорост и степен на запълване, стъпка на вертикално изместване на дюзата и температура на материала при принтиране в препоръчителни от производителя на материала диапазони чрез моделиране по [4, 5]. Различните режими на създаване са предпоставка за различни потребителски свойства на произведените елементи.

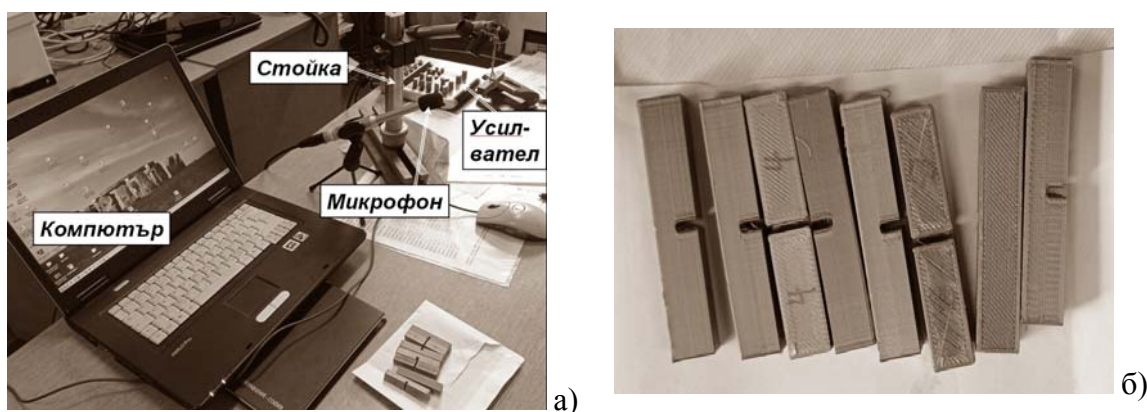
В табл.1 са показани режимите за изработка на изследваните образци. Те са изработени от материал PET-G чрез дюза с диаметър 0.4 mm.

Табл. 1. Режими на изработка на изследваните опитни образци.

№	t° , C	V, mm/s	Степен на запълване, %	Стъпка на изместване на дюзата, mm
1	210	65	100	0.2
2	230	80	100	0.2
3	210	80	100	0.2
4	230	65	80	0.2
5	210	65	80	0.2
6	230	80	90	0.2
7	220	70	90	0.2
8	220	70	90	0.4

Забележка: Режимите на принтиране са моделирани от проф. Тончев. Образците са изработени от студента Цоньо Хадживеликов.

На база на втори закон на Нютон се установява, че за греди с постоянно сечение е налице аналитична зависимост между плътност на материал, модул на Юнг и резонансни честоти на гредите при възбуждане на огъващи моди [1, 2]. Но в средната част на изследваните образци е формиран едностранно с дълбочина 5 mm. Следователно тя е неприложима за образци с форма на използваните. Затова е създадена друга емпирична зависимост между горните параметри за всеки конкретен образец чрез използване на метод на крайните елементи. Тя е построена чрез определяне на резонансните честоти на 3D модел на принтираните образци за различни стойности на плътността и на модулите на линейна деформация. Теоретичните стойности на резонансните честоти са определени чрез инженерен числен метод – метод на крайните елементи, който е с доказано приложение при решаване на подобни задачи [6,7]. Определени са първите резонансни честоти при свободно трептене на образците при различни маси и модул на линейна деформация.



Фиг. 1. Изображения на измервателната система (а) и на опитните образци (б)

Опитните образци са изследвани при стайна температура чрез окачване в средната си част на идеално гъвкава и неразтеглива нишка. Върху тях е прилагано единично натоварване, като в къс времеви диапазон дистанционно е измервано звуковото налягане, генерирано от образците в отговор на външното динамично въздействие. Измерването е проведено чрез микрофон с чувствителност 149 dB,

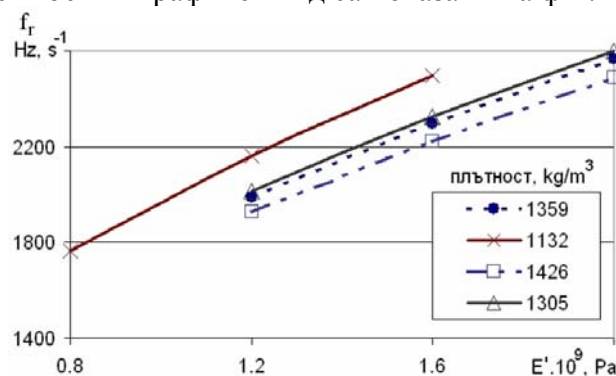
разположен в близката зона на изследваните образци. Сигналят от микрофона се подава чрез универсален усилвател в USB порт на компютър и се записва в цифров вид.

Измерванията са проведени в звукоизолирано помещение. Предварително е направена калибровка на измервателната система.

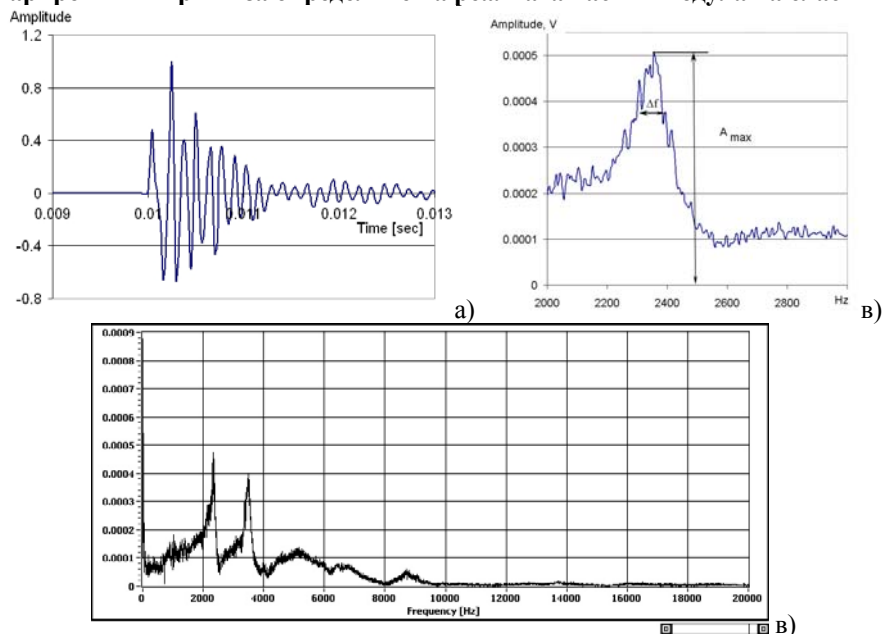
На фиг. 1 са показани изображения на измервателната система (а) и на опитните образци (б).

РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО ЗА АПРОБАЦИЯ НА МЕТОДИКАТА

Методиката е апробирана чрез определяне на еластичните свойства на описаните в табл. 1 образци. Измерени са масите m на образците с точност 5 mg. Като се има предвид обема на модела е изчислена плътността ρ на материала на пробите. За получените стойности на масите са построени емпирични зависимости за реалната стойност на модула на еластичност E' в зависимост от масата и първата резонансна честота. Такива зависимости в графичен вид са показани на фиг. 2.



Фиг. 2. Тарировъчни криви за определяне на реалната част E' модула на еластичност E^* .



Фиг. 3. Резултати от измерване на генериран сигнал (а), на спектрален анализ на общия сигнал(б), на спектрален анализ за определяне на Δf

По регистрирания отговор на образците вследствие на еднократно динамично въздействие е определена първата резонансна честота чрез анализиране на спектъра по метод на Фурие. Установените стойности на първата резонансна честота е в диапазона 1765 – 2347 Hz.

На фиг. 3 са показани типични резултати от измерване на генериран сигнал (а) и на спектрален анализ, получен чрез специализиран софтуер (в реално време при измерване) (б) и след обработка за измерване на стойността Δf (в). Стойността на Δf е определена по графичен път, след което е изчислен $\tan \delta$.

Получените стойности за m , $\tan \delta$, E' , E'' и E^* са показани в табл. 2. Резултатите показват, че режимът на изграждане на образците оказва съществено значение върху техните механични свойства, вкл. модула на еластична деформация. Максимално значение оказва стъпката на изместване на дюзата. От съществено значение към изследваните механични свойства оказва и режимът на напластяване на материала, като закономерност не се определя.

Табл. 2. Получени резултати за изследваните образци

№	m , g	ρ , kg/m^3	f_{r1} , Hz	$\tan \delta$	$E' \cdot 10^9$ Pa	$E'' \cdot 10^9$ Pa	$E^* \cdot 10^9$ Pa
1	6.655	1357.8	2308	0.038	1.597	0.06	1.598
2	7.000	1428.2	2360	0.045	1.965	0.088	1.967
3	6.655	1357.8	2310	0.046	1.597	0.073	1.599
4	6.980	1424.1	2370	0.057	1.965	0.112	1.968
5	6.655	1357.8	2340	0.048	1.597	0.76	1.6
6	6.400	1305.8	2350	0.045	1.611	0.072	1.61
7	6.650	1356.8	2375	0.048	1.597	0.069	1.599
8	5.550	1132.4	1799	0.0425	0.8	0.034	0.801

Оценка на грешката

Причини за допускане на грешка в получените резултати се дължат на интерференция на вълни, водещи до отклонение в измерваната резонансна честота, а така също и на широчината на импулса Δf , измерване на масата, измервателната апаратура, отчитане на резултатите. За намаляване на грешките в резултат на интерференцията е ограничавано времето за измерване и отстраняване на неуспешните опити. За всеки образец са проведени десет успешни измервания на спектъра. Получените резултати за основните фактори, оказващи влияние на точността са показани в табл. 3. Получената относителна грешка ε_{E^*} за комплексната стойност на модула E^* е в рамките на 1.9%, определена чрез зависимости за работа с комплексни числа.

Табл. 3. Относителни грешки на измерване при провеждане на експериментите, %.

Означенie	Стойност	Стойност, %	Означенie	Причина	Стойност, %
ε_m	Маса	0.07	ε_f	Резонансна честота	0.9
$\varepsilon_{E'}$	Модул E'	1.6	$\varepsilon_{\Delta f/f_r}$	Относителна широчина на спектъра на ниво $A_{\max}/\sqrt{2}$	0.5
$\varepsilon_{E''}$	Модул E''	5	ε_{E^*}	Комплексен модул E^*	1.9

Получените резултати показват съществено изменение едновременно на плътността и модула на еластична деформация в зависимост от технологичните режими за създаване на опитните образци. Реалната част E' на модула се променя 2.4 пъти, от 0.8 до $1.96 \cdot 10^9$ Pa. В подобен порядък е изменението на комплексната част E'' на модула.

ИЗВОДИ

Апробирана е вибро-акустична методика за изследване на механични свойства на полимерни материали. Определен е комплексния модул на линейна деформация на 3D принтирани опитни от PET-G образци с различна плътност чрез инженерни числени методи съвместно с вибро-акустически експерименти. Чрез числените методи са създадени теоретични зависимости между резонансна честота и реална част на модул на еластичност за конкретна плътност на материала. След измерване на първи резонанс е определена реалната част на модула за конкретен образец, а по формата на спектъра – комплексната част на модула. Резултатите от проведените изследвания показват, че при изменение на плътността на материала от 1132 до 1428 kg/m³ модулът на линейна деформация се променя в диапазона 800 - 1967 МПа.

Очакванията са, че с едновременното измерване и анализиране на стойности на плътността и резонансните честоти е възможно да се разшири приложението на вибро-акустичния метод за бърза оценка на свойства на готови изделия, като хомогенност на материала, контрол на геометрия и др.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Broch J. Mechanical Vibration and Shock Measurements. Brüel & Kjær'. 1984. ISBN 87 8735534 5
- [2] Ferry J. Viscoelastic Properties of Polymers. John Wiley and Sons. USA. 1980. ISBN: 978-0-471-04894-7
- [3] Mashchenko V, V. Krivtsov , V.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
- [4] Tontchev N., Materials science, Effective solutions and technological variants, - Lambert, Academic Publishing, 2014.
- [5] Tonchev N., E. Yankov. Multi-criteria support for decision-making by shifting restrictions Basic information. International Scientific Conference “Mathematical Modeling”, 2017, No 1, ISSN DOI10.13140/RG.2
- [6] Коларов И. ДИАГНОСТИКА НА ПОВРЕДИ В МАШИНИ ЕЛЕМЕНТИ ЧРЕЗ МОДАЛЕН АНАЛИЗ. Монография, София, 2015, ISBN 978-619-90083-4-8
- [7] Коларов И. Виброакустично изследване на локална порестост в отливки. сп. "Механика, транспорт, комуникации" том 17, брой 3, 2019 г. ID 1896 : 2019/3. ISSN 2367 – 6620. <https://mtc-aj.com/article.1896.htm> стр. XIII-1 - XIII-7

Допълнителна информация: Работата е създадена при разработване на научноизследователски проект « Развитие на научната инфраструктура в катедра MEMX за реализиране на интегрирани научни изследвания в енергоспестяващи технологии за автоматизирано производство на машинни елементи », подкрепен от ВТУ „Тодор Каблешков” и финансиран по наредба на МО от 16.09.2016 г .

VIBRO-ACOUSTIC EVALUATION OF THE JUNG MODULE OF 3D PRINTED SAMPLES. APPROVAL OF RESEARCH METHODOLOGY

Ivan Kolarov
ikolarov@vtu.bg

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

Key words: *Jung module of polymeric materials printed in different technological modes*

Abstract: *Approbation of the methodology for vibro-acoustic determination of the modulus of linear deformation of polymer samples produced by 3D printing is the task of this work. The specimens are made to study the impact toughness of the material and have a square cross-section, with a slit in the middle.*

A method for determining the modulus of elastic deformation by vibro-acoustic method has been adapted. On the base on Newton's second law, it is established that there is an analytical relationship between material density, Jung modulus and bending resonances of beams with constant cross section. However it is not applicable to specimens of another shape. Therefore, empirical dependencies between the above parameters have been created using the finite element method. They are created by calculation the resonant frequencies of 3D models of printed samples for different values of density and Jung modules.

The methodology was tested by studying 8 standard samples. The following parameters have been changed: speed, degree of filling, step of vertical displacement of the nozzle and temperature of the material when printing in the range recommended by the material manufacturer. The resonant frequencies of the tested samples in the range up to 20 kHz were measured and their masses were measured with an accuracy of 5 mg. Taking into account the volume of the model, the density of the material for the samples was calculated. According to the created empirical dependence, the values for the modulus of linear deformation for each sample are obtained.

A change in the density of the material was found from 1132 to 1428 kg / m³, and the modulus of linear deformation - from 800 to 1965 MPa. Destructive research is to be conducted in comparison with the obtained data.

The conducted researches give grounds to believe that the used methodology is also applicable for control of machine elements produced by energy saving technologies.