

ВИБРО-АКУСТИЧНА ОЦЕНКА НА ТЕХНИЧЕСКО СЪСТОЯНИЕ НА 3D ПРИНТИРАНИ ОБРАЗЦИ

Иван Коларов
ikolarov@vtu.bg

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

Ключови думи: безразрушителна вибро-акустична оценка на 3D принтирани машинни елементи.

Резюме: Задача на настоящата работа е контрол на структурата на 3D принтирани машинни елементи от материал PET-G с оглед постигане на предваритено обоснована механични свойства. От една страна, настройването на технологичния режим на принтера чрез специализиран софтуер осигурява задаване на подробна информация и позволява постигане на желаните от потребителя характеристики на готовото изделие. От друга страна, експлоатационните качества на готовото изделие могат да се променят от неотчетени отклонения на материала, на принтера и др.

За постигане на поставената задача са изследвани едновременно масата и собствените честоти на елементите. Използват се данни от вибро-акустичен анализ на епруветки, произведени при различни технологични режими, за които е установено изменение на плътността на материала от 1132 до 1428 kg/m³, а на модула на линейна деформация – от 800 до 1965 МПа. Те се въведени като входящи характеристики в специализиран инженерен продукт за определяне на резонансни честоти на принтираните машинни елементи. Теоретично се определят резонансни честоти на произвежданите машинни елементи. Те се сравняват с реалните стойности на машинните елементи и резултатите дават основание за оценка на техническото състояние.

Методиката е апробирана чрез изследване на принтирани зъбни колело и рейка. Те са произведени с големи кухини по вътрешността на детайлите и със сравнително добро качество на повърхнината от едната си страна, като от другата страна са оставени незатворени. Регистриран е звуковият спектър в диапазона до 20 kHz и са определени резонансните честоти на образците. Измерени са масите и чрез обема на модела е изчислена плътността на материала. По построената емпирична зависимост са получени данни за модула на линейна деформация за всеки образец.

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

контрол на качеството на малки серии от отговорни машинни елементи с оглед намаляване на времето и ресурса за оценка на механичните свойства.

ВЪВЕДЕНИЕ

Производството на машинни елементи чрез т.н. адитивни технологии за нуждите на различни сектори от индустрията се утвърждава като практика, която осигурява гъвкавост и икономичност при производство на неголеми серии. Все по-достъпни стават машините за това производство – 3D принтери, като същевременно се разширява предлагането на пазара на напълнители под формата на нишка. По тези технологии се произвеждат неметални и метални машинни елементи, а механичните свойства на използваните материали се задава на база химическия състав след експеримент на опитни образци и се препоръчва да се използва като информация без да се дават гаранции за нея [1]. Така например, изследване в [2] установява увеличение на якостта на материала PET-G в рамките на 40% (от 30 до 45 МПа) след топлинна обработка принтирани при 255 °C опитни образци чрез поставяне в прахообразна смес при температура 220 °C в рамките на 30 min, като се установява изменение на модула на Юнг при статично измерване от 1.6 до 1.9 GPa. За същия материал за якостта в [1] е препоръчана стойност 53 МПа. Изследванията в [3] показват, че е налице промяна на модула на Юнг, определен динамично чрез вибро-акустичен метод от режима на принтиране, в т.ч. и от процента на запълване на образците с цел намаляване на разходите за производство. При установена настройка на принтера режимът може да се промени в резултат на влиянието на околната среда, изменение на механични и геометрични свойства на нишката на напълнителя, а така също и вида на принтера, първоначално зададени параметри на работа, механично износване на отговорни елементи от него. Възможни са и странични причини, както и груби грешки.

Възможност за намаляване на теглото и на себестойността на изделията се разглеждат в [4]. Представят се експерименти с опитни образци – плоски епруветки от материал ABS, създадени от повърхностни слоеве с плътност на материала 100% от тази на напълнителя и вътрешна среда с плътност 40%. Установява се зависимост между броя на повърхностните слоеве и якостта на образците при статично натоварване на опън. Няма данни за поведението на образците при динамично натоварване.

Възможност за оценяване на механични характеристики при наличие на отвори и кухини в конструкции дават инженерни методи, основани на анализ на 3D модели [5, 6]. Установяват се механични напрежения в т.ч. около концентратори на напрежения, регистриране на технически отклонения чрез динамично изследване на поведението на конструкции и др. Перспективен за бърза оценка на техническото състояние на 3D принтирани образци е вибро-акустичния метод, който е достъпен и съчетан с други общо технически измервателни средства позволява получаване на надеждни резултати

Цел на настоящата работа е да изследва вибро-акустичното поведение на 3D принтирани при различни режими машинни елементи с оглед регистрация на нецялостности, възникващи в процеса на изработка.

ПОСТАНОВКА ЗА РЕШАВАНЕ НА ЗАДАЧАТА

Задачата е решена чрез теоретико-експериментален подход. Използвани са елементи от зъбна предавка – зъбна рейка и зъбно колело.

1. Модулът на Юнг е определен теоретично при различна средна плътност на материала с механични характеристики получени в [3] по методика [7] в след моделиране на технологичните режими в [8, 9]. За целта машинните елементи са конструирани в средата на софтуерния пакет Solid Edge при следните геометрични размери: модул 2mm, брой на зъбите на зъбното колело 21 бр. и на зъбната рейка 40 бр.

Те са динамично анализирани в средата на Solidworks при задаване на стойности на модула на Юнг и средната плътност на материала PET-G, получени в [3]. Изчислени са първите основни резонансни честоти за съответните деформационни моди при средна плътност на материала от 70 до 100% и са построени тарировъчни зависимости за модула на еластичност.

2. Трансформиране на 3D моделите в STL формат, подходящ за създаване на алгоритъм за тяхното отпечатване на 3D принтер. За целта е използван специализиран софтуер Cura 18.05. Той е настроен за управление на процесите на 3D принтер Wanhao-D9 400, който работи с нишка с диаметър 1.75 mm и използва дюза с диаметър 0.4 mm. Зададени са следните основни параметри:

дебелина на полагаения слой – 0.3 mm

плътност на повърхността на материала -100%

плътност на вътрешността на материала – неизвестен, останал от предишна настройка на софтуера;

брой на повърхностните слоеве – 3 бр.

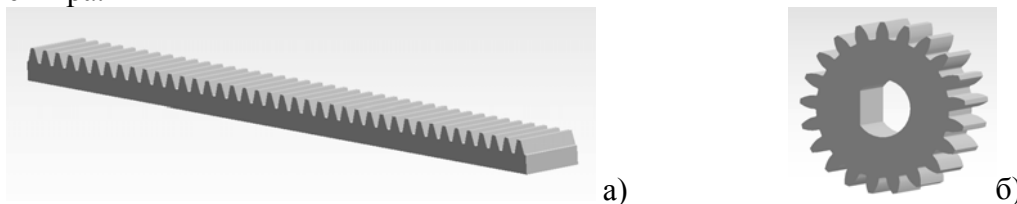
Зъбното колело и рейка са изработени в направление, съответстващо с направлението на зъбите с широчина съответно 23 и 22 mm, като горния повърхностен слой е оставен недовършен, така че да се осигури видимост към вътрешността на структурата на елементите.

3. Измерване на масите и изчисляване на средната плътност на елементите.

4. Динамично натоварване на образците и анализ на звуковия спектър предизвикан от вибрациите им. Направени са серия от измервания, записани в цифров вид. Записите са регистрирани чрез микрофон, свързан чрез усилвател към компютър. Спектърът е направен по цифров път. По резултатите за плътността на материала и звуковия спектър след динамично въздействие се дава заключение за модула на Юнг.

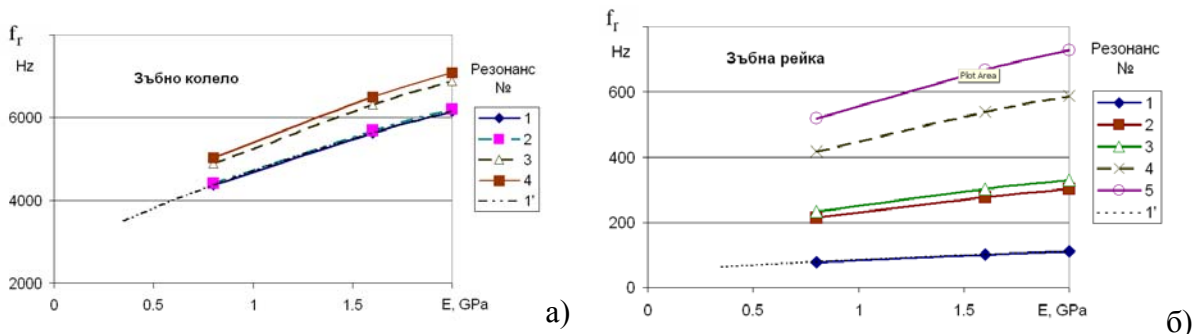
ТЕОРЕТИЧНИ РЕЗУЛТАТИ

На фиг. 1 са показани 3D модели на изследваната зъбна предавка, състояща се от зъбно колело и зъбна рейка. Изчислени са първите резонансни честоти f_r на елементите за плътност на плътността на материала в диапазона от 1132 до 1428 kg/m³ и на модула на линейна деформация – от 800 до 1965 МРа. Те са показани на фиг. 2, като с числата 1 – 5 са означени съответния номер. Стойностите на честотите 1 и 2 на зъбното колело се намират на честотно разстояние около 50 Hz, което е предпоставка за трудности при тяхното разпознаване, а така също и за сливане в една обща амплитуда на спектъра.



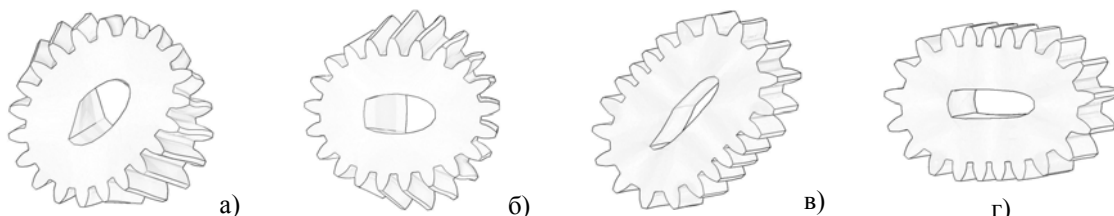
Фиг. 1. Изображения на елементи от изследваната зъбна предавка; а) зъбна рейка, б) зъбно колело

Същите изводи са валидни за честоти 3 и 4 за зъбното колело, а така също и за честоти 2 и 3 за зъбната рейка. На същите изображения с 1' са показани апроксимирани зависимости за първа резонансна честота на двата елемента в диапазона на модула на еластичност извън диапазона с експериментални данни (за обща плътност по-малка от 70%) с цел специфициране на очакваната област на честотата за материал с подобна плътност.



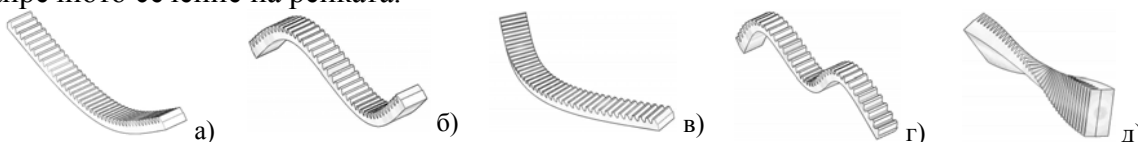
Фиг. 2. Резултати за резонансни честоти, изчислени за зъбното колело (а) и за зъбната рейка (б).

За изясняване на причините за близко честотно разположение на някои резонансни честоти са показани на фиг. 3 и 4 деформационните моди, при които се предизвикват. Първа и втора деформационна мода на зъбното колело (фиг. 3 а и б) са симетрични спрямо оста на колелото, но са разположени във взаимно перпендикулярни равнини. Тъй като зъбното колело е несиметрично в тези равнини, т.е. налице е известна разлика в коравината на сечението на огъване по тях, то тази разлика се отразява в резонансните честоти в двете взаимно перпендикулярни сечения.



Фиг. 3. Деформационни моди на зъбното колело при резонанс №: а) – 1; б) – 2; в) – 3; г) – 4

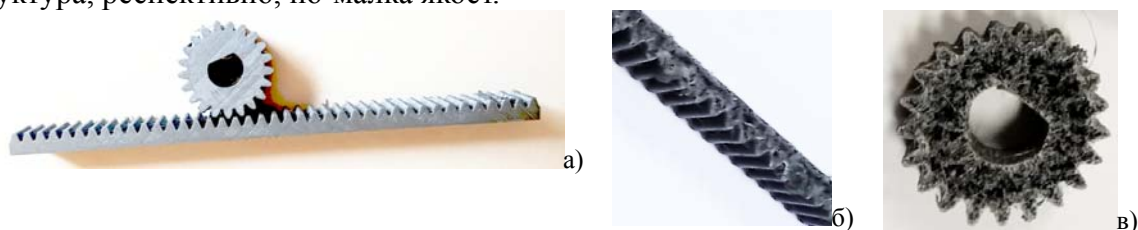
За зъбната рейка между резонанс 1 и 2 е налице значителна честотна разлика (2.7 пъти) поради факта, че те се предизвикват от огъващи моди с последователни номера, възникващи в една равнина. Докато огъващите моди на резонанс 2 и 3 лежат в различни равнини и резонансните честоти от тях се обуславят от геометричните размери на напречното сечение на рейката.



Фиг. 4. Деформационни моди на зъбната рейка при резонанс №: а) – 1; б) – 2; в) – 3; г) – 4; д) – 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

Произведените зъбни колело и рейка са изградени заедно, те са показани на фиг. 5. Видно е, че докато на външен вид елементите изглеждат коректно изработени, то в резултат на отклонения в технологията за отпечатване, вътрешността има пореста структура, респективно, по-малка якост.



Фиг. 5. Изображения на изследваните елементи в комплект(а), съставена от зъбна рейка (б) и колело (в).

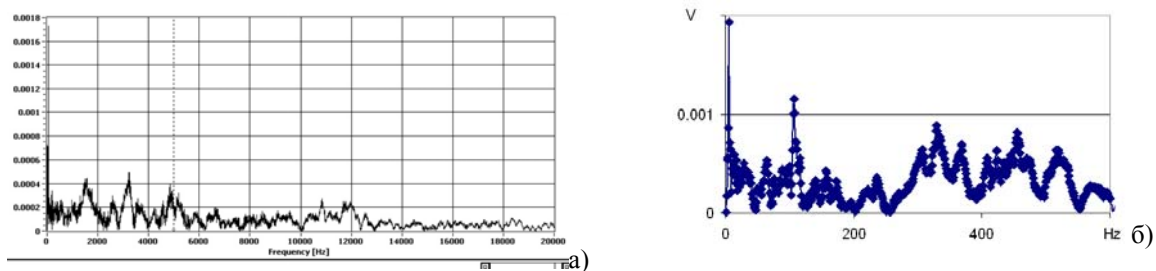
Измерени са теглата на елементите и е установено средна стойност на плътността в рамките на 420-460 g/m³, което за плътност на материала PET-G от 1428 g/m³, определена в [3] отговаря на средна степен на запълване 30 – 32%.

За измерване на резонансните честоти зъбното колело е окачвано на идеално гъвкава нишка, а рейката – върху две опънати върху специализирана стойка нишки. Спектърът е измерван във времеви диапазон от 10 – 15 ms. Момент от измерването на резонансните честоти на рейката е показан на фиг. 6. Спектърът на регистрираните сигнали се записва като растерно изображение и в цифров вид чрез специализиран софтуер Score.



Фиг. 6. Изображение на момент от изследване на зъбната рейка.

Типични резултати от измерване на резонансните честоти са показани на фиг. 7., като за зъбното колело е показан запис на целия спектър в диапазона до 20 kHz, а за зъбната рейка – обработено изображение в MS Excel. Измерени са за първата резонансна честота стойности на зъбното колело 1837 Hz, а за рейката 54 Hz. Те са отчетени след сравнение на регистрираните спектрограми и търсене на сходство между тях в очаквания честотен диапазон. Общо за измерванията е забелязано необходимост от значително по-силно динамично въздействие в сравнение с епруветки от същия материал или елементи от метал, изследвани в [3 и 10], както и наличие на допълнителни шумове, които затрудняват разчитането на спектрограмата.



Фиг. 7. Резултати за звуковите спектри за зъбното колело (а) и за зъбната рейка (б).

Чрез измерените първи резонансни честоти е определена средна стойност модула на линейна деформация $E=0.3$ GPa.

ИЗВОДИ

Представените вибро-акустични изследвания потвърждават приложимостта на метода за безразрушителна оценка на 3D принтирани машинни елементи. Използва се обща физическа зависимост между еластични свойства на материала, плътност и резонанс за образци с постоянна форма. Методиката е приложена за оценяване на

принтирани зъбно колело и рейка и по вибро-акустичен път са получени стойностите плътност на материала 420-460 g/m³ и модул на линейна деформация E=0.3 GPa. Най-достъпно и лесно реализуемо за изследваните машинни елементи е определяне на плътността на принтираните елементи чрез измерване на тяхната маса. Значителни трудности са регистрирани при измерване на резонансните честоти поради наличие на допълнителни вибрации, например в резултат на локални резонансни процеси по повърхностните слоеве на елементите, съпоставими по амплитуда с тези на деформационните моди.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] <https://www.simplify3d.com>
- [2] Amza C. and all. Enhancing Mechanical Properties of Polymer 3D Printed Parts. *Polymers*, 2021, 13, 562. <https://doi.org/10.3390/polym13040562>
- [3] Коларов И. Вибро-акустично определяне на модула на еластичност на 3D принтирани образци. Аprobация на методика за изследване.
- [4] Wika G et al The influence of printing parameters on selected mechanical properties of FDM/FFF 3D-printed parts. *Materials Science and Engineering* 227 (2017) 012033 2017
- [5] 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
- [6] Ralev V., D. Atmadzhova. FAILURE ANALYSIS IN PASSENGER BOGIES FROM THE RAILWAY SYSTEM OF THE REPUBLIC OF BULGARIA. *Proceedings of X International Conference "Heavy Machinery-HM 2021"*, Vrnjačka Banja, 23– 25 June 2021
- [7] 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
- [8] Tontchev N., *Materials science, Effective solutions and technological variants*, - Lambert, Academic Publishing, 2014.
- [9] 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
- [10] Коларов И. ДИАГНОСТИКА НА ПОВРЕДИ В МАШИНИ ЕЛЕМЕНТИ ЧРЕЗ МОДАЛЕН АНАЛИЗ. Монография, София, 2015, ISBN 978-619-90083-4-8

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 ASSESSMENT OF TECHNICAL CONDITION OF 3D PRINTED SAMPLES

Ivan Kolarov
ikolarov@vtu.bg

*Todor Kableshkov University of Transport,
1574 Sofia, 158 Geo Milev Str.
THE REPUBLIC OF BULGARIA*

Key words: *Non-destructive vibro-acoustic evaluation of 3D printed machine elements.*

Abstract: *The task of the present work is to control the structure of 3D printed machine elements of PET-G material in order to achieve pre-justified mechanical properties. On the one hand, the setting of the technological mode of the printer by means of specialized software provides setting of detailed information and allows to achieve the desired by the user characteristics of the finished product. On the other hand, the performance of the finished product may change due to unreported deviations of the material, the printer, etc.*

In order to achieve the set task, the mass and the natural frequencies of the elements are studied simultaneously. Data from vibro-acoustic analysis of tubes produced under different technological regimes, for which a change in the density of the material from 1132 to 1428 kg / m³ and the modulus of linear deformation - from 800 to 1965 MPa are used. They are introduced as input characteristics in a specialized engineering product for determining the resonant frequencies of printed machine elements. Resonant frequencies of the produced machine elements are determined theoretically. They are compared with the actual values of the machine elements and the results give a basis for assessing the technical condition.

The methodology was tested by examining a printed gear and rack. They are manufactured with large cavities on the inside of the parts and with relatively good surface quality on one side, leaving unclosed on the other side. The sound spectrum in the range up to 20 kHz was recorded and the resonant frequencies of the samples were determined. The masses were measured and the density of the material was calculated using the volume of the model. Based on the created empirical dependences, data on the modulus of linear deformation for each sample were obtained.

Research indicates that the methodology used is also applicable to the control of machine elements produced by energy-saving technologies. It would find application for non-destructive quality control of small series of responsible machine elements in order to reduce the time and resource for evaluation of mechanical properties.