

FRI-1.317-1-MEMBT-11

STUDY OF THE GEOMETRIC ACCURACY IN THE MANUFACTURING OF ORTHODONTIC APPLIANCES¹

Veselina Dukova

Department of Materials Science and Technology,
 “Angel Kanchev” Univesity of Ruse
 E-mail: vdukova@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Roussi Minev

Department of Materials Science and Technology,
 “Angel Kanchev” Univesity of Ruse
 E-mail: rus@uni-ruse.bg

Assist. Prof. Emil Yankov

Department of Materials Science and Technology,
 “Angel Kanchev” Univesity of Ruse
 E-mail: eyankov@uni-ruse.bg

Abstract

The report presents the results of a study of the geometric accuracy of orthodontic aligners manufactured using digital technology (scanning and 3D printing). The study is performed using the coordinate grid method. A specific test peace was designed with the help of which deviations from nominal dimensions were assessed. The influence of the inclination angle, as a basic technological parameter on accuracy, was established. The results show good comparability with the required accuracy for the devices manufactured using conventional methods (e.g. thermoforming).

Keywords: orthodontic appliances, aligners, 3D printing

1. Постановка на проблема

В ортодонтската практика е необходимо да се отделя голямо внимание на точността на устройствата. Те трябва да съответстват на зъбната анатомия на пациента. Прозрачните алайнери, ретейнерите, фиксираните устройства се изработват специфично за даден клиент, с помощта на цифрови сканирания или отпечатьци. Допустимите отклонения зависят от няколко фактора: свойства на е материалите, технология за вземане на отпечатьци (реплика, сканиране); производствен процес (репликиране, послойно изграждане).

Точностните параметри на тези устройства са обект на редица изследвания [1-5]. В Таблица 1 е дадено обобщение на типичните изисквания.

Таблица 1 Точностни характеристики на ортодонтски техники

Уред/Технология	Прецизност/Точност	Допустими отклонения
Интраорални скенери	±15 to ±25 μm (на повърхността)	≤50 μm
СВСТ (3D образна диагностика)	±100 μm за меки тъкани	≤200 μm (за твърди тъкани)
Прозрачни алайнери	±0.3mm ±0.5mm (окончателно прилягане)	≤0.5mm

¹ Докладът е представен на пленарната сесия на 24 октомври 2025 с оригинално заглавие на български език: „ИЗСЛЕДВАНЕ НА ГЕОМЕТРИЧНАТА ТОЧНОСТ ПРИ ПРОИЗВОДСТВОТО НА ОРТОДОНТСКИ АПАРАТИ”.

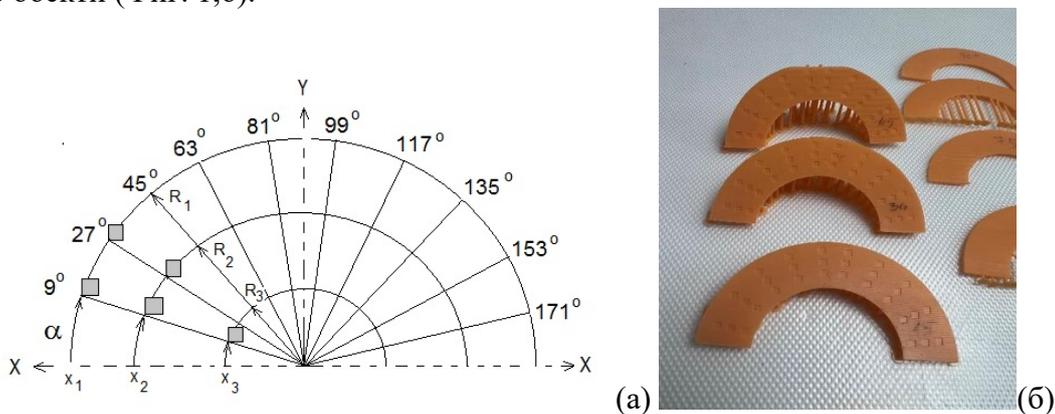
Уред/Технология	Прецизност/Точност	Допустими отклонения
Фиксирани брекети	$\pm 0.1\text{mm}$ (за поставяне на скоби)	$\leq 0.2\text{mm}$ (за толеранс на тел)
Прецизност на движението на зъбите	$\pm 0.3\text{mm}$ (за правилно прилягане и сила)	$\leq 0.5\text{mm}$
Свиване на материала	2-3% (по време на производството)	-
Вариация на силата	$\pm 1\text{N}$ (за постепенно движение на зъбите)	$\leq 0.5\text{mm}$

Целите и задачите на това изследване могат да се обобщят както следва:

1. Създаване и адаптиране и методика за изследване на характеристиките на размерната точност на SLA 3D принтер Acuretta, който се използва в технологичната верига по разработване на ортодонтски системи. Конструирание на пробно тяло и координатна мрежа за изследване на размерната точност, което да е адаптирано към геометрията и конструкцията на ортодонтски алайнери и да е подходящо за прилагане на метода на координатните мрежи;
2. Изследване на точността на SLA 3D принтер Acuretta, предназначен за изготвяне на ортодонтски системи (алайнери). Определяне на оптимални технологични параметри за производството на геометрично точни системи. Изследване на разпределението на относителните деформации в обема на тялото, ъгловите и радиални неточности в зависимост от основния технологичен параметър – ъгъл на наклона спрямо координатната ос.

2. Методология за изследване точността на 3D принтиране или RP (rapid prototyping) технология

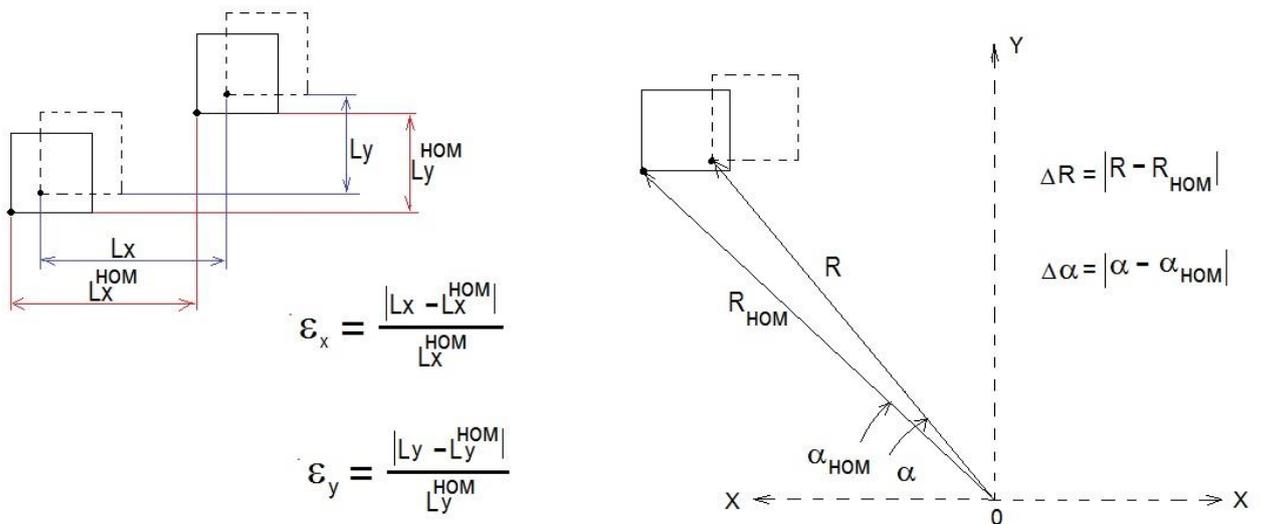
Съществуват множество предложени и прилагани на практика пробни тела, но те страдат от множество недостатъци [6,7], най-важния от които е липсата на универсалност, т.е не може да бъде избягната разликата от реалните детайли. Един ефективен подход е прилагането на така наречения метод на координатните мрежи (GM – grid method). Методът се основава на координатна мрежа, генерирана върху CAD модела на пробно тяло и анализ на трансформацията на мрежата, след като пробното тяло е произведено и измерено. Методологията на координатните мрежи, адаптирана и използвана в нашето изследване, се основава на мрежа от квадратчета (Фиг.1,а), генерирана върху подковообразен CAD модел (плоча) с дебелина 1мм съпоставима с тази на алайнерите. Формата и размерите на пробното тяло наподобяват зъбен венец с цел да се доближат условията на изграждане до тези на реалните обекти (Фиг. 1,б).



Фиг.1 Схема на използваната координатна мрежа (а); изградени образци (б).

Разграфяването на мрежата е направено с радиални оси завъртени една спрямо друга на ъгъл 18° , започвайки от ъгъл 9° , така че се получава поредица от : $9^\circ, 27^\circ, 45^\circ, 63^\circ, 81^\circ, 99^\circ, 117^\circ, 135^\circ, 153^\circ, 171^\circ$. Концентричните окръжности са разположени през $3,75 \text{ mm}$ в радиално направление. След като плочата е произведена се прави оценка на разликите между номиналните (CAD) размери на мрежата ($L_x^{\text{НОМ}}$ и $L_y^{\text{НОМ}}$) и измерените размери на мрежата (L_x и L_y) върху изградения тестов образец (Фиг. 2). Измерванията са направени със стерео микроскоп Carl Zeiss и софтуер

Отклонения, които се определят по абсолютна стойност, дават възможност за оценяване на точността на метода в рамките на целия обем на пробното тяло и следователно по отношение на отделните части на зъбния венец.



Фиг. 2 Изчисляване параметрите на отклонение на координатната мрежа.

При прилагането на методиката с вариране на различни технологични параметри, те дават възможност за прецизиране и оптимизиране на условията за изграждане на ортодонтските конструкции. В нашия случай са направени изследвания, показващи значението на ъгъла на наклона ($15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$) на образца спрямо осите на изграждане (например, ос X). Този технологичен параметър е избран за анализиране, тъй като информацията за него е най-оскъдна и недостатъчно обоснована. Останалите параметри, като време на полимеризация, интензитет на лъча, геометрия на подпорките и др. са оптимизирани от фирмите производителки на оборудването, зададени са в упътването на SLA принтерите и следва да се прилагат.

3. Резултати и анализи

Описаната предходния параграф методология позволява събирането на голямо количество данни, дори от един тестов образец, осигурявайки надеждни резултати. Данните могат да бъдат представени в графичен изглед, който показва как размерните отклонения на изградения RP модел са разпределени в рамките на целия обем (Фиг. 3- Фиг.6).

Обикновено се приема ъгъла на наклона спрямо координатната ос да бъде около 30° . Целта е да се налами сечението на полимеризация, текущ слой на изграждане. Този слой е необходимо да се минимизира с цел намаляване на напреженията и деформациите, водещи до изкорубване (“curling”). Това обаче води до съществено увеличаване на влиянето вертикалната ос на движение - Z във формирането на обекта и намаляване на точността. Известно е, че точността по тази ос е обикновено по ниска.

Представените на Фиг. 3 цветни диаграми са конструирани така, че да съдържат стойността на изчислените параметрите. По-големите стойности на относителните отклонения ε (%), абсолютните отклонения на радиуса R (mm), ъгъла α (grad) са представени в по-топли цветове (нюанси на червеното), а по-ниските стойности в по-студени цветове (нюанси на зелено) и жълто-кафяви нюанси на междинните стойности. Полетата в средата съответстват на dentes “incisivi”, разположените в ляво и дясно: съответно - dentes “canini”, “premolares” и “molares”. Този начин диаграмата показва точността на изготвяне на ортодонтските устройства по отношение на различните зъби от зъбния венец. Както се вижда, тя не е идентична за различните видове зъби.

Като резултат от анализа на стойностите и цветовото представяне на резултатите, при малки ъгли на наклона на пробното тяло спрямо оста X най-точни се оказват средните зони, тези които ще въздействат на dentes “incisivi” (те обикновено са обект на корекция) и сравнително по-неточни са зоните в периферията, отговарящи за останалите видове зъби.

9°	27°	45°	63°	81°	99°	117°	135°	153°	171°
				0,94	2,17				
			1,27	0,93	1,51	0,75			
		1,35	1,28	0,53	0,61	1,75	1,80		
	0,83	1,63	1,38			1,98	1,11	1,02	
7,85	0,08	1,96					1,55	0,44	4,93
6,45	1,08							0,46	5,22
6,87									5,05

(a) - 15°

9°	27°	45°	63°	81°	99°	117°	135°	153°	171°
				6,56	5,61				
			0,08	7,03	5,06	0,68			
		0,23	0,16	6,72	6,62	0,49	0,84		
	6,04	0,61	0,70			0,87	1,50	1,01	
7,80	6,08	0,40					0,94	1,90	8,32
8,46	6,13							1,72	5,11
9,21									7,33

(б) - 30°

9°	27°	45°	63°	81°	99°	117°	135°	153°	171°
				7,09	4,94				
			0,46	6,25	4,82	0,47			
		0,01	0,08	5,93	4,99	0,66	1,44		
	1,61	0,88	0,37			0,45	2,07	0,39	
11,64	3,45	0,00					1,50	2,24	3,70
12,74	4,21							1,78	3,90
11,26									4,09

(c) - 45°

Фиг. 3 Цветни диаграми на разпределение на относителните отклонения ε_x (%) при наклон на образца спрямо оста $X = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$.

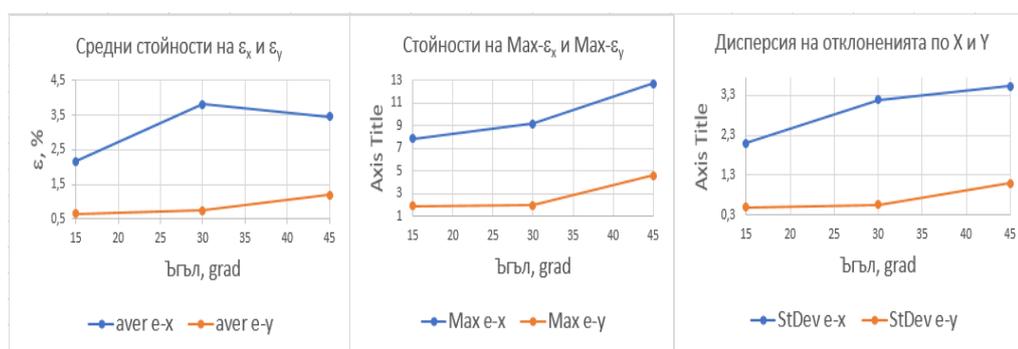
При по-големи ъгли на наклон - 30° и 40° по-точна е периферията в сравнение с централната част на образца защото текущото за изграждане сечение е по-голямо и оказва по-голямо влияние върху различното свиване на сеченията и следователно ще генерира по-големи напрежения и „изкорубване“.

Установяваме разликата в средните и максималните относителни отклонения по двете оси: ε_x и ε_y , $Max-\varepsilon_x$ и $Max-\varepsilon_y$, както и в дисперсията на резултатите (Фиг. 4). Това се обяснява с влиянието на съседните, свиващи се по различен начин сечения. Тъй като образца е ориентиран с по-големия си размер по оста X , то материалните точки оказват по-голямо съпротивление по ос X (огъващия съпротивителен момент $M_x > M_y$) и това ще води до по-слаби деформации по оста Y (Фиг. 5).

Като цяло увеличението на ъгъла на наклона на образеца води влошаване на точността. Това се дължи на намаляване на текущото сечение, което води до нестабилност и отместване на полимеризацията контур. Освен това, геометрията на пробното тяло се оформя в по-голяма степен от точността на позициониране на светлината в равнина X-Y и в по-малка степен от точността на позициониране по ос Z (тя е по-ниска, тъй като зависи от механични фактори).

Точността на изграждания детайл в зависимост от отстоянието от центъра (Фиг. 6) на полукръглата „подкова“ не се променя съществено при повечето от изследваните параметри (ϵ , ΔR , $\Delta\alpha$). В син цвят са показани стойностите на отклонение на ъгъла, радиуса и относителната деформация в най-външните слоеве на сечението, а със сив цвят - в най-вътрешните. Разликата не надхвърля 5% и се дължи на факта, че по-външните слоеве се изграждат по-бавно и температурните разлики със съседните слоеве е по-голяма (свиването и деформациите стават малко по-големи).

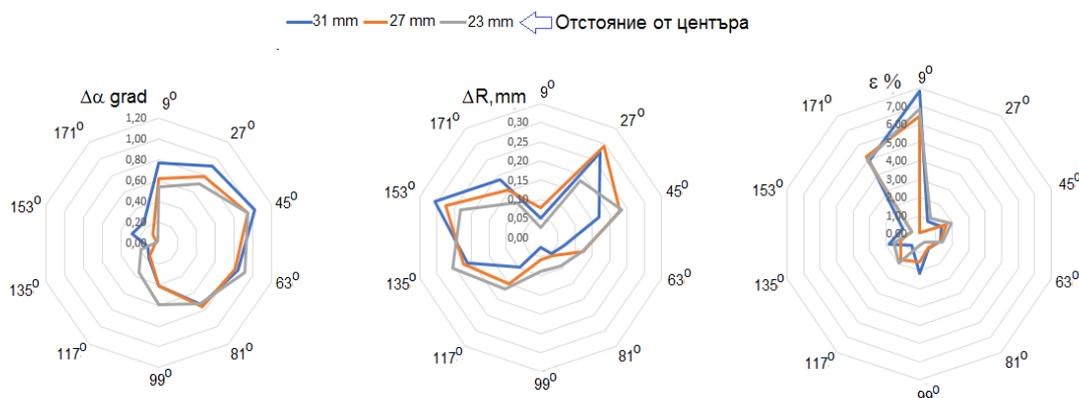
Обобщение на резултатите е представено в Тблици 2 и 3.



Фиг. 4 Разлика в относителните отклонения по двете оси: ϵ_x и ϵ_y , максималните деформации ($\text{Max-}\epsilon_x$ и $\text{Max-}\epsilon_y$) и дисперсията ($\text{StDev-}\epsilon_x$ и $\text{StDev-}\epsilon_y$).



Фиг. 5 Текущо полимеризиращо сечение.



Фиг. 6 Радарни диаграми, показващи отклонението в ъгъла $\Delta\alpha$ (наклон 30°), радиуса ΔR (наклон 45°) и относителната деформация ϵ (наклона 15°) за различни образци.

Таблица 2 Относителни отклоненията при различен наклон спрямо ос X.

	15°		30°		45°	
	ε_x %	ε_y %	ε_x %	ε_y %	ε_x %	ε_y %
Средни стойности (Aver)	2,16	0,65	3,81	0,74	3,45	1,19
Максимални стойности (Max.)	7,85	1,89	9,21	1,99	12,74	4,65
Дисперсия (StDev)	2,10	0,50	3,19	0,56	3,53	1,09

Таблица 3 Стойности за отклоненията при различни ъгли на наклон спрямо ос X.

	$\Delta\alpha$, grad			ΔR , mm		
	15°	30°	45°	15°	30°	45°
Ср. стойности (Aver)	0,28	0,51	0,61	0,15	0,52	0,24
Макс.стойности (Max.)	0,96	1,03	1,30	0,31	1,86	0,43
Дисперсия (StDev)	0,22	0,34	0,45	0,09	0,65	0,10

4. Изводи и обобщение на резултатите

Резултатите от изследването на размерните точности на фото полимерната технология за изготвяне на ортодонтски системи могат да се обобщят по следния начин:

1. Разработена е ефективна методология, базирана на метода на координатните мрежи за определяне на размерната точност и деформациите, която е адаптирана за вида на произвежданите обекти - ортодонтски апарати.
2. Получени са резултати, които показват, че точността на изследвания 3D принтер е достатъчна за нуждите на ортодонтията: 0,3..0,5 mm за прозрачни алайнери. Средните относителни отклонения при нашите експерименти достигат са около 2-3% при най-неблагоприятните случаи на разположение на образца. Това означава - 100 μ m при големина на обекта 5mm. Максималните ъглови отклонения по дъгата на зъбния венец са около 1°, а в радиално направление - при благоприятния случай на ориентация - 150 μ m.
3. Установено е, че отклоненията по ос X са значително по големи (около три пъти). Този феномен следва да се отдаде на различното поведение при свиване на изграждащите се слоеве от телата. Следва да се препоръча при несиметрични изделия, ориентацията на детайлите да бъде с по-дългата „ос“ по направление на координатната ос - Y или при ориентация по X, технологичния наклон да бъде зададен спрямо другата - ос Y.
4. Резултатите от анализа на данните от образците показва, че увеличаването на ъгъла на наклона (в последователност 15°, 30°, 45°) на изгражданите обекти спрямо координатната ос води до намаляване на точността, като средните относителни отклонения достигат 3,5 %, а максималните стойности – 12%. Тези стойности са допустими от гледна точка на изделията, но следва да се отчита при назначаване на технологията. Като препоръчителна стойност може да се приеме - 15°, тъй като по-малък от този наклон води до намаляване на надеждността и възможност за отлепване на образца.
5. Точността на метода в радиално направление на дъговидната проба (респективно ортодонтските обекти) не се променя значително.

Литература

1. Hollender, L., et al. (2019) "Reliability of intraoral digital scans for orthodontic appliance fabrication." *Journal of Dental Research*. 98(8): 877-884.
2. Liang, X., et al. (2017). "The influence of dimensional accuracy on the clinical performance of clear aligners." *Journal of Clinical Orthodontics*. 51(3): 157-164.
3. <https://www.invisalign.com/how-it-works/invisalign-digital-experience> (Oct.2025)
4. Zhu et al. (2020) "Biomechanical considerations in clear aligner treatment: A review." *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 158(6): pp. 789–801. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2020.06.028>], [Liu, J., et al. (2018). "The role of dimensional accuracy in reducing treatment time in orthodontics." *International Journal of Orthodontics*. 34(3): 101-106
5. Liu, J., et al. (2018) "The role of dimensional accuracy in reducing treatment time in orthodontics." *International Journal of Orthodontics*. 34(3): 101-106
6. E. Minev, (2012) *Grid Method Studies of the Geometrical Uncertainties in Free Form and Micro Processes*, A thesis submitted to the Cardiff University for PhD degree, <http://orca.cf.ac.uk/32291/1/2012MinevEPhD.pdf>
7. E. Minev, R. Minev (2010) *Utilizing a grid method for accuracy study of micro SLA parts*, 4M Conf., Plastipolis, Oyonnax, France, ISBN: 978-981-08-6555-9, pp. 257-260