



Габриела Викторова Коцева

МЕХАНИЧНИ И ТРИБОЛОГИЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА
ПОЛИМЕРИ И КОМПОЗИТИ ПОЛУЧЕНИ ЧРЕЗ 3D ПРИНТИРАНЕ

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация
за придобиване на образователната и научна степен „доктор“

по докторска програма “Автоматизирани системи за обработка на информация
и управление“

професионално направление 5.2. „Електротехника, електроника и автоматика

Научен ръководител:
Проф. д-р Николай Иванов Стоименов

София, 2025 г.

Съдържание

Глава 1

Литературен обзор и анализ. Основни принципи и приложения на трибологията. Технологии, устройства и методи за изследване на полимери с 3D печат.....	8
1.1.Инженерна трибология. Трибологията като наука.....	8
1.1.1.Историческо развитие на трибологията.....	8
1.1.2. Кратък преглед на трибологията в България.....	8
1.1.3. Развитието на трибологията в света.....	9
1.1.4. Индустриалното и финансово значение на трибологията	9
1.2. Основни принципи и приложения на трибологията.....	9
1.2.1. Въведение в трибологията	10
1.2.2. Параметри, характеризиращи взаимодействието между повърхностите.....	11
1.2.3. Съществуващи стандартни методи за изпитване на триене, износване, адхезия и възстановяване.....	11
1.3. Механични свойства.....	12
1.3.1. Твърдост	13
1.3.2. Деформация	13
1.3.3. Умора	13
1.4.Химия на трибо-повърхностите	14
1.4.1. Адсорбция.....	14
1.4.2. Гранично смазване.....	14
1.4.3. Повърхностен филм.....	14
1.4.4. Дифузия	15
1.4.5. Повърхностна химия на MEMS	15
1.5. Физични свойства	15
1.6. Форми на износване	16
1.6.1. Абразивно износване.....	16
1.6.2. Ерозивно износване.....	16
1.6.3. Кавитационно износване	17
1.7. Заключение.....	17

Глава 2.

Технология на трибологичните изследвания. Устройства и експериментално оборудване.	18
2.1. Съществуващи методи и видове трибологични изследвания на полимери и композити.....	18
2.2. Устройства за изследване на микротвърдостта на полимерни материали	18
2.3. Апаратура за изследване на коефициента на възстановяване - високоскоростна камера NAC MEMRECAM HX6.....	19

2.4. 3D технологии, материали и устройства за печат	19
2.4.1. Отлагане на разтопен материал (FDM или FFF)	20
2.4.2. Фотополимеризация - Стереолитография (SLA), DLP (Digital Light Processing) и процес на печат PolyJet	20
2.4.3. Селективно лазерни процеси	21
2.4.4. Директно метално отлагане (DMD)	21
2.4.5. Триммерно отпечатване (3DP)	22
2.4.6. Струйна технология (Inkjet)	22
2.4.7. Наслойване на листов материал (LOM – Laminated Object Manufacturing)	22
2.4.8. 3D ТЕХНОЛОГИИ ИЗПОЛЗВАНИ В ИЗСЛЕДВАНЕТО	22
2.5. Полимери и композити за 3D печат	25
2.5.1. Видове пластмаси за 3D печат	25
2.5.2. Видове смоли за 3D печат	26
2.6. EDEM Software	26
2.7. Заключение	27

Глава 3.

Съставяне на методики за провеждане на изследванията	28
3.1. Методики за 3D принтиране	28
3.1.1. Съставяне на методика за 3D принтиране на плочки	28
3.1.2. Съставяне на методика за 3D принтиране на цилиндри	29
3.1.3. Съставяне на методика за 3D принтиране на сферични тела	29
3.2. Методика за анализи на микротвърдостта на полимери и композити	30
3.3. Методика за изследване на трибологични свойства на полимери и композити получени чрез 3D принтиране	31
3.4. Методика за създаване на симулация в среда на EDEM Software	32
3.5. Заключение	33

Глава 4.

Експериментални резултати и изследвания на 3D полимерни материали, включително композитни	34
4.1. Резултати от изследваните коефициентите на триене на 3D отпечатани проби	34
4.1.1 Коефициент на триене при плъзгане	34
4.1.2. Коефициент на триене при търкаляне	37
4.1.3. Коефициент на възстановяване	38
4.1.4. Изследване и приложение на трибологични характеристики на 3D принтирани материали за тактилните възприятия на хора в неравностойно положение	39
4.2. Резултати от изследването на микротвърдостта на материалите	42
4.3. Симулационни изследвания на 3D отпечатани проби с EDEM софтуер	46

4.4. Заключение.....	48
Глава 5	
Насоки за бъдещи изследвания	49
5.1. Усъвършенстване на методиките за 3D принтиране	49
5.2. Разширяване на изследванията на механичните и трибологичните свойства	49
5.3. Усъвършенстване на симулационните модели.....	49
5.4. Приложение в инженерната и социалната практика за подобряване на живота и на зрително увредени хора.....	49
5.5. Развитие на научно-приложната база	49
5.6. Заключение.....	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	50

Увод

Основна грижа на съвременната индустрия и обществото е разработването и непрекъснатото подобряване на енергийно ефективни технологии. За обществото като цяло това помага за запазването на природните ресурси и минимизира отрицателното въздействие върху околната среда от необузданото потребление на гориво. Що се отнася до индустрията, тя удовлетворява потребителя и регулатора и по този начин поддържа конкурентоспособността. Науката трибология е в основата на това търсене на енергийно ефективна технология на много различни нива.

Трибологията играе роля в разработването на енергийно ефективни технологии на много различни нива като например в производството, в позволяването на компонентите да работят с дълъг живот и ниско триене по време на употреба и в създаването на практични иновативни, енергоспестяващи двигатели и трансмисии. Разглеждат се пет конкретни области, в които трибологията е предизвикана от развитието на енергийната ефективност. Те варират от намаляването на триенето в компонентите и последващите проблемни много тънки хидродинамични филми до трибологичните последици, присъщи на разработването на много високотемпературни адиабатни двигатели. Във всички тези области, както и в много други, се заключава, че трибологията играе ключова роля при въвеждането на енергийно ефективни технологии.

Настоящата дисертационна работа е структурирана както следва:

В ГЛАВА 1 е направен обзор и анализ на трибологията като наука и инженерна дисциплина. Проследено е историческото ѝ развитие в света и в България, както и индустриалното ѝ значение. Представени са основни принципи и приложения, класически теории за триенето и методи за определяне на силата на триене. Разгледани са механични (твърдост, деформация, умора), химични (адсорбция, гранично смазване, повърхностни филми) и физични свойства (адхезия, топлопроводност и др.). Анализирани са формите на износване, както и технологиите за 3D печат, материалите (полимери, композити) и техните свойства.

В ГЛАВА 2 са описани съществуващи методи за трибологични изследвания на полимери и композити, както и видове експериментални устройства. Представени са уреди за измерване на микротвърдост, износване и триене при различни режими, както и специфични методики за изпитване. Разгледани са съвременни 3D техники за печат и тяхната роля за създаване на детайли за изпитване.

В ГЛАВА 3 са съставени методики за провеждане на изследвания на физико-механични и трибологични свойства на 3D отпечатани полимери и композити. Обособени са процедури за анализ на микротвърдост, износване и триене (плъзгане, търкаляне, възстановяване). Включени са методики за работа със симулационен софтуер (EDEM), осигуряващ моделиране на процесите.

В ГЛАВА 4 са представени експериментални резултати от изследвания на 3D отпечатани материали, включително композитни. Анализирани са коефициенти на възстановяване и резултати от симулации с EDEM софтуер. Направени са сравнения и обобщения за влиянието на различни материали и параметри върху техните трибологични характеристики.

В ГЛАВА 5 са разгледани бъдещи стъпки за развитие на дисертационния труд. Получените експериментални резултати дават възможност за разширяване на изследванията, чрез които да бъдат подобрени детайлите при 3D принтиране. Друг възможен аспект е разширяване на трибологичните изследвания в областта на 3D принтирането и приложението. Точното определяне на ключови свойства дава възможност за създаване на по-точни симулационни модели.

Цел и задачи на дисертационния труд

Въз основа на направеният обзор и сравнителен анализ на актуалното състояние на постиженията в областта на трибологията се формулира целта на настоящия дисертационен труд.

ЦЕЛ:

Целта на настоящия труд е чрез изследване и определяне на механични и трибологични свойства на полимери и композити, получени чрез 3D принтиране да бъдат придобити нови знания относно техните параметри, характеристики, да бъдат създадени иновативни приложения. Оптимизиране на технологичните процеси и за разработване на нови подходи при проектиране на функционални полимерни и композитни материали, произведени чрез адитивни технологии. Да бъдат подобрени входните данни при симулационни процеси, което би довело до по-точни резултати.

ЗАДАЧИ:

За постигане на поставената цел трябва да бъдат решени следните задачи:

1. Да се извърши обзори и анализ на трибологични процеси, технологии и устройства за получаване на полимери и композити, методи за изследване на физико-механични и трибологични свойства на полимери, получени чрез 3D принтиране
2. Да се разработят принципи и подходи за изследване на физико-механични и трибологични свойства на полимери с 3D печат.
3. Да се анализират микротвърдостта и характеристиките на износване на 3D материали.
4. Да се извърши анализиране триене при плъзгане, триене при търкаляне и коефициент на възстановяване
5. Да се реализират симулационни изследвания на 3D отпечатани проби с EDEM Software.
6. Да се реализира симулационно моделиране на коефициента на възстановяване.
7. Да се предложи комплексен подход за характеризиране на използваните 3D принтери.
8. Да се реализират и анализират експериментални изследвания.

Апробация на резултатите

Резултати, включени в дисертацията, са докладвани на: международни конференции в страната и чужбина

Част от резултатите са представени на следните конференции:

Списък на публикациите по дисертацията

На Международни Конференции в чужбина:

1. Kotseva, G. & Stoimenov, N. (2025) 'Overview of tribology as an interdisciplinary science', in 19th International Conference on Tribology – SERBIATRIB '25. Kragujevac: Faculty of Engineering, University of Kragujevac. ISBN 978-86-6335-128-8.
2. Stoimenov, N., Gyoshev, S. & Kotseva, G., 2025. A Study of the Hardness of 3D-Printed Materials for Blind Applications. 3rd International Conference on Computers in Natural Sciences, Biomedicine and Engineering (COMCONF), accepted for publication
3. Kotseva, G., Stoimenov, N., Gyoshev, S., Georgieva, V.. Tribological Processes in TPU and HIPS 3D Printing Materials. 18th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV 2024), Published by IEEE, 2025, 1136-1141
4. Kotseva G., Stoimenov N., Kandeва M.. Tribological processes in the material for 3D printing filament HIPS. 12th International Conference on Mechanical Technologies and Structural Materials (MTSM 2023), Croatian Society for Mechanical Technologies, Croatia, 2023, ISSN:1847-7917, 137-144

На Международни конференции в България

1. Kotseva G., Stoimenov N., Klochkov L.. Tribological Studies of 3D Printed Filaments. An Overview. XXXII International Scientific and Technical Conference, ADP - 2023., Sozopol, Bulgaria, Publishing house of TU-Sofia Publisher Department "Automation of Discrete Production Engineering", 2023, ISSN:2682-9584, 150-154
2. Kotseva G., Georgieva V., Gyoshev S.. Investigation of Tribological Parameters of 3D Printed Samples. International Scientific Journal Machines.Technologies.Materials, 19, 8, Scientific and technical union of mechanical engineering, 2023, ISSN:ISSN (Print) - 2535-0153 ISSN (Online) - 2535-0161, 255-259
3. Stoimenov N., Kotseva G., Georgieva V., Classification of 3D print technologies, 34th International Scientific and Technical Conference Automation of Discrete Production Engineering 2025, ISBN 978-619-7667-74-5, DOI: 10.53656/adpe-2025, Publisher: Az-buki National Publishing House, pp. 40-53

Глава 1

Литературен обзор и анализ. Основни принципи и приложения на трибологията. Технологии, устройства и методи за изследване на полимери с 3D печат

1.1. Инженерна трибология. Трибологията като наука

Трибологията е интердисциплинарна наука, изследваща триенето, износването и смазването на контактни повърхности в относително движение. Тя има ключово значение в инженерството - от автомобилната и авиационната индустрия до машиностроенето - като спомага за удължаване на експлоатационния живот и намаляване на енергийните загуби [1–3].

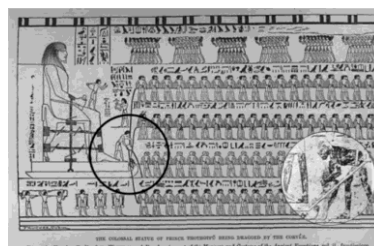
Развитието на трибологията подпомага създаването на нови материали и технологии с подобрени характеристики, а загубите от триене и износване могат да достигнат до 5–7% от БВП, което подчертава нейното икономическо и технологично значение [4].

1.1.1. Историческо развитие на трибологията

Трибологията изследва триенето, смазването и износването на взаимодействащи повърхности. Терминът произлиза от гръцкото *tribos* – „триене“ [1–3]. Още в древността - триенето намира приложение – от запалване на огън и изработка на инструменти до използване на естествен битум като смазка. Археологически свидетелства от Египет показват ранно прилагане на лагери при гърнчарски колела (Фиг. 1.1), както и използване на течни смазки при транспортиране на масивни каменни блокове (Фиг. 1.2).



Фиг. 1.1. Дървен лагер за каменни колела, статуя, древен Египет.



Фиг. 1.2. Транспортиране на египетска *El Bersheh*, около 1900 г. пр.н.е.

1.1.2. Кратък преглед на трибологията в България

Целенасочените изследвания в областта на трибологията в България започват през 1963 г. в Лабораторията по „Контактна механика“, основана от проф. д-р Георги Данов в Техническия университет – София [5]. През 1974 г. тя се преобразува в „Лаборатория по трибология“ под ръководството на проф. Нягол Манолов [6], а по-късно – в Национален координационен център. От 1984 г. България е редовен член на Международния съвет по трибология.

През 1993 г. се създават Обществото на триболозите в България (ОТБ) и Балканската трибологична асоциация (БТА) с първи ръководител проф. д-р Н. Манолов. БТА, включваща шест балкански държави, провежда регулярни конференции. През 2008 г. в Созопол се състои VI юбилейна конференция „Балкантриб 08“ (Assenova, Kandeveva, 2008) [7] с около 130 доклада в девет секции.

В момента Лабораторията по трибология продължава своята научна, образователна и приложна дейност. Разработена е съвременна концепция за развитие на трибологията (Манолов и др., 2007) [8], включена в научната номенклатура под № 01.02.02 (ДВ, бр. 34/1990) [9]. Провежда се семинар „Трибология и интердисциплинарност“ и е създаден Национален

експертен съвет по трибология към ИНГА. Списание „Контакти“, с гл. редактор проф. д-н Н. Манолов, представя нови идеи в областта на контактните взаимодействия [10]. Трибологични изследователски групи действат и в БАН и редица висши училища в страната.

1.1.3. Развитието на трибологията в света

Трибологията е широко развита в редица индустриално водещи държави.

В САЩ изследвания се извършват в множество университети и научни центрове, а индустрии като автомобилостроене, аерокосмическа и енергетика широко внедряват трибологични технологии [11].

Германия е водеща благодарение на силната си машиностроителна и автомобилна индустрия, подкрепена от активни научни институти [12].

В Япония се развиват високоефективни компоненти за автомобилната и електронната индустрия, като трибологията е ключов елемент в научноизследователската дейност [13].

Великобритания има дългогодишни традиции, а Институтът по трибология в Университета на Лийдс е сред водещите центрове [11].

През последните десетилетия Китай засилва научните разработки, насочени към усъвършенстване на производствени технологии и разширяване на индустриалните приложения [14].

Тези държави инвестират значителни ресурси в трибологията, което води до важни технологични иновации и подобрена ефективност в множество отрасли.

1.1.4. Индустриалното и финансово значение на трибологията

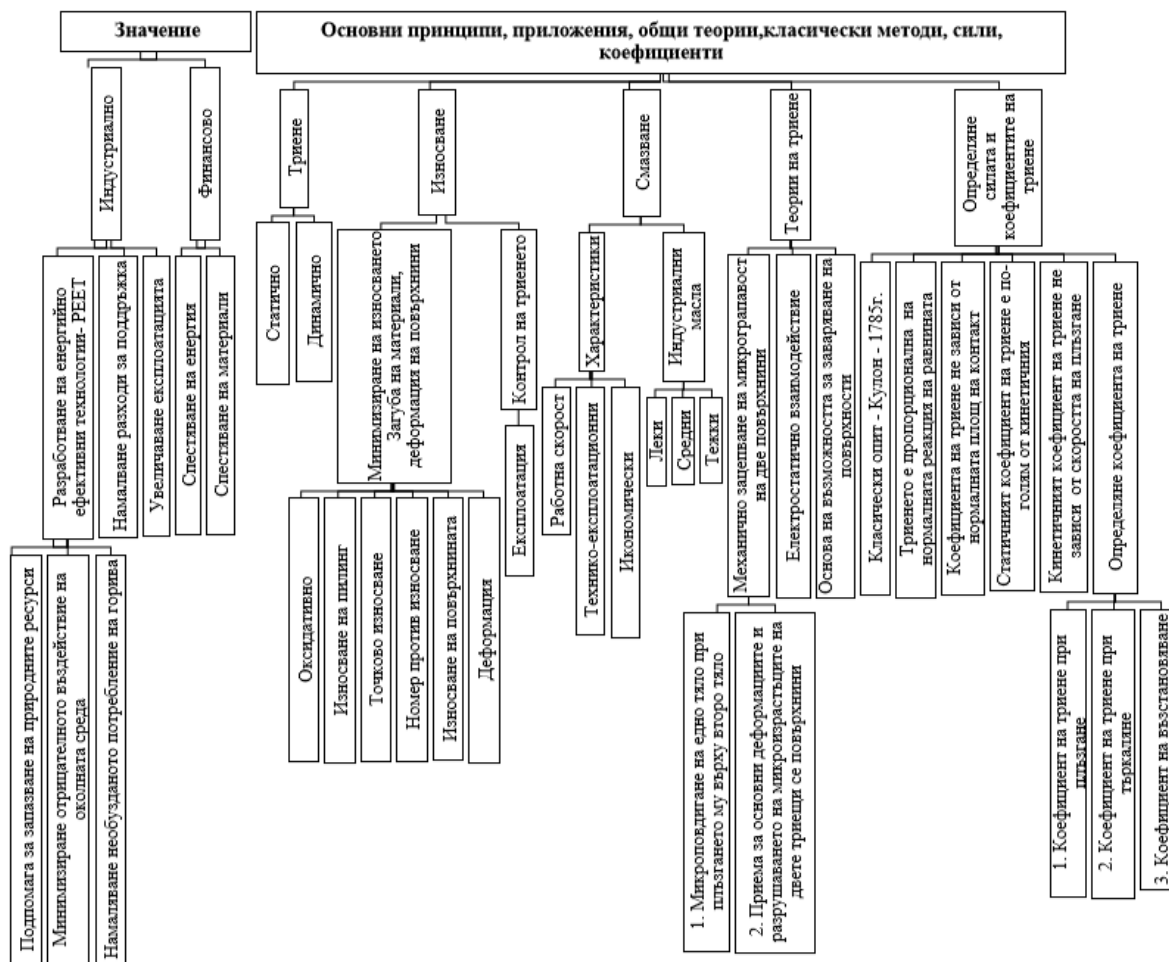
Индустриалните революции създават нови трибологични предизвикателства, свързани с триенето и износването на повърхности. Основната цел на трибологията е намаляване на загубите от триене и износване чрез подходящи решения в смазването, модификацията на повърхностите и материалознанието [15,16]. Триенето и износването водят до значителни енергийни и материални разходи — около 23% от световното енергопотребление е свързано с трибологични контакти [17].

Примерно в САЩ правилният избор на смазки за 3 млн. червячни предавки с мощност 7,5kW повишава ефективността с 5%, спестявайки 9,8 млрд. kWh и 0,6 млрд. USD. Глобално новите трибологични технологии могат да намалят енергийните загуби с 40% за 15 години и 18% за 8 години, равнявайки се на 1,4% от световния БВП [18]. В Обединеното кралство модерните решения могат да намалят разходите за износване до 95% за 10 години, съответствайки на прогнозите в доклада на Jost [19].

1.2. Основни принципи и приложения на трибологията

Макар терминът трибология да е непознат за мнозина и да представлява нова област на науката за някои сфери, той безспорно е част от живота на всички нас. Всъщност, в нашето ежедневие ежедневно срещаме множество примери за трибологични приложения.

На фиг.1.4. е създадена схема- класификация на значението и основните принципи, приложения, общи теории, класически методи, сили и коефициенти събрани в науката трибология. Разглежда се индустриалното и финансовото значение, което изисква познаването на тази наука в съвременния свят. Основните принципи, приложения, общи теории.



Фиг.1.4. Схема- класификация на основните принципи на трибологията

1.2.1. Въведение в трибологията

В момента трибологията, която е нова област на науката, е дефинирана в много речници като "науката за взаимодействието на повърхности в относително движение" или "изучаването на триене, износване и смазване, както и проектирането на лагери" [20]. На фиг. 1.5. е представена илюстрация на триъгълника на трибологията.



Фиг.1.5. Триъгълник на Трибологията

- 1) *Триене* - Триенето е естествено явление с важна роля в ежедневието, но в трибологията основно се разглежда като причина за износване и енергийни загуби. Различават се два режима: статично и кинетично (динамично) триене, като в двата случая то представлява сила, насочена противоположно на движението или потенциалното движение между повърхностите [21].
- 2) *Износване* - Износването е основен процес на загуба на материал или деформация на повърхността, който може да доведе до отказ на механични елементи. В трибологията то се разглежда като постепенно отстраняване на материал при механични и/или химични

взаимодействия между повърхности [22] и се определя като прогресивна загуба на вещество при относително движение [23-25].

3) **Смазване** - Смазването е ключов метод за намаляване на триенето и контрол на износването. Терминът идва от лат. *lubricatus* („правя хлъзгаво“) и обозначава субстанция, която променя взаимодействието между контактни повърхности. Смазочните средства могат да бъдат течности, греси, твърди смазки или газове, като основната им функция е да ограничават триенето, износването и температурното натоварване; без тях настъпва директен контакт и риск от повреди [21].

- **Смазочни материали** - Смазочните средства се класифицират като течни, греси, твърди и газове.
- **Характеристики на маслата** - Индустриалните смазочни масла се предлагат в различни видове, като правилният избор е критичен за конкретното приложение. Според произхода си те са минерални, синтетични или смесени (Фиг. 1.6).



Фиг.1.6. Схема на смазочните материали

1.2.2. Параметри, характеризиращи взаимодействието между повърхностите

За анализ на процесите, свързани с триенето, са създадени различни теории, отразяващи особеностите на различните материали, гладкостта на триещите повърхности и действащото налягане: *Теории за механичното зацепване; Теория за електростатичното взаимодействие; Теория, основана на възможността за “заваряване” на повърхностите*

Представените таблица 1.1. и таблица 1.2. са взети от - Коефициенти на триене по "Теоретична механика", Божидар Тошев, Техника, 1973 [26].

Таблица 1.1. Взаимодействие на трибо-двойки при плъзгане

Двойка (при плъзгане)	При покой	При движение
Стомана - Чугун	0.15	0.1
Стомана - Лед	0.017	0.014
Стомана - Дърво	0.55	0.4
Дърво - Дърво	0.65	0.35
Дърво - Камък	0.7	0.3
Кожа - Метал	0.6	0.25

Таблица 1.2. Взаимодействие на трибо-двойки при търкаляне

Двойка (при търкаляне)	[mm]
Вагонно колело - Релса	0.6
Дървено колело - Дърво	15.0
Автомобилна гума - Асфалт	45.0
Автомобилна гума - Паваж	25.0

1.2.3. Съществуващи стандартни методи за изпитване на триене, износване, адхезия и възстановяване

Методите за изпитване на основните механични параметри като: триене при плъзгане, триене при търкаляне, коефициент на възстановяване, както и допълнителни характеристики

като адхезия, износване (коефициент на износване) и абразия, според международно признати стандарти са следните, представени в таблици от 1.3 до 1.6:

Таблица 1.3. Триене при плъзгане

Стандарт	Област на приложение	Бележки
ISO 8295:1995	Статичен и кинетичен коефициент на триене за пластмасови фолиа и листове (≤ 0.5 mm)	Главно за контрол на качеството
ASTM D1894-24	Пластмасови фолиа	Американски аналог, резултатите не са напълно съпоставими с ISO 8295
ISO 6601:2002	Рамков стандарт за изпитвания на триене и износване при плъзгане	Определя условия като натоварване, скорост и контактни условия
ASTM E1911-19	Динамичен трибометър (Dynamic Friction Tester)	Позволява оценка на триенето като функция на скоростта; приложим в лабораторни и реални условия

Таблица 1.4. Триене при търкаляне

Стандарт	Област на приложение	Бележки
ISO 18164:2005	Коефициент на търкаляне за нови пневматични гуми (автомобили, автобуси, мотоциклети)	Измерване при свободно търкаляне и контролирани условия
ISO 18164:2005/DAM 1	Декелерационен подход	Използва зависимост време–разстояние за изчисляване на съпротивлението
ISO 28580:2018	Ролиращо съпротивление на пътни гуми	Съвременен метод, евентуално замества ISO 18164

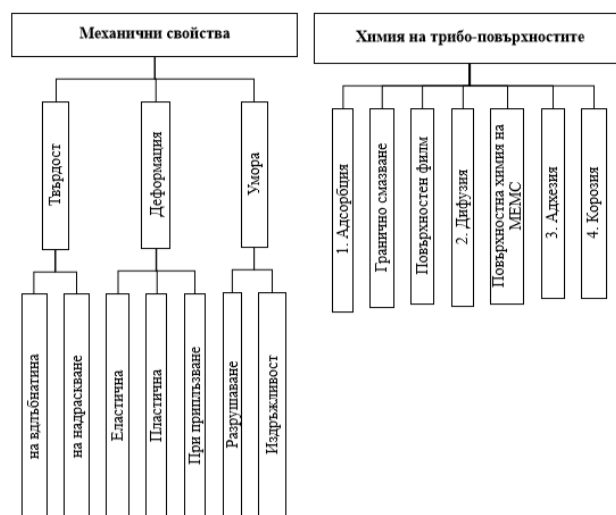
Таблица 1.5. Коефициент на възстановяване (Coefficient of Restitution, COR)

Стандарт	Област на приложение
ASTM F1887	Вертикално изпускане на топка върху твърда повърхност
ISO 10545-5	Измерване на COR за керамични плочки
ASTM C203	Ударно поведение и възстановяване на нископлътни материали, включително полимерни композити

1.3. Механични свойства

Класификация на механичните свойства и химията на трибо-повърхностите е представена на фиг.1.12. Механичният дял включва твърдост (при вдлъбнатина и надраскване), деформация (еластична и пластична, включително при приплъзване и разрушаване), умора и издръжливост като ключови показатели за поведение при продължително натоварване.

Химичният дял разглежда процеси като адсорбция, формиране на гранично смазване и повърхностни филми, както и дифузия. Включени са също адхезия и корозия, както и специфични прояви при микроелектромеханични системи (MEMS), където повърхностните взаимодействия са от критично значение.



Фиг.1.12. Схема-класификация на компонентите в трибологията- механични свойства и химия на трибо-повърхностите

1.3.1. Твърдост

Твърдостта описва способността на материал да устои на постоянна деформация или проникване, като по-високата твърдост показва по-голяма устойчивост при натоварване. Основните видове твърдост са: *Твърдост на вдлъбнатина*; *Твърдост на надрасване*; *Твърдост на отскок*.

1.3.2. Деформация

1) Еластична деформация

Това е мигновена и възстановима деформация във форма или размери, която се проявява само при наличие на приложено нормално натоварване и изчезва при неговото премахване [27]. Еластичната деформация се определя от модула на еластичност на Йънг (E). При превишаване на определен праг настъпва пластична, тоест постоянна деформация [28].

2) Пластична деформация

В кривата напрежение-деформация, когато материалният образец е подложен на нарастващо напрежение над границата на провлачване (Y), материалът вече не се връща в първоначалната си форма след освобождаване на напрежението. Деформацията над границата на провлачване е независима от времето и се нарича пластична деформация [29].

3) Деформация при пълзене

Деформацията при пълзене е постепенно изменение на формата на материал под постоянно напрежение и повишена температура, което може да доведе до разрушаване. Якостта при пълзене зависи от напрежението и времето, а при циклично натоварване процесът на умора се ускорява поради взаимодействие пълзене–умора [30, 31]. Типичната крива на пълзене включва три етапа: преходен (еластична и частично пластична деформация), стационарен (постепенно почти постоянно нарастване на деформацията) и третичен (ускорена деформация до разрушаване).

1.3.3. Умора

Умората е критичен фактор в инженерния дизайн, като над 80% от отказите в механичното обслужване се дължат на това явление [29]. Още през 1800 г. е установено, че цикличните натоварвания причиняват напуквания в мостови и железопътни конструкции.

- 1) *Разрушаване поради умора* - При циклично натоварване на повърхността могат да се зародят микропукнатини, които постепенно нарастват до критичен размер и водят до разрушаване..
- 2) *Издръжливост на умора* - Обичайно се разглеждат два етапа: (1) зараждане на пукнатини и (2) тяхното разпространение [29].

1.4. Химия на трибо-повърхностите

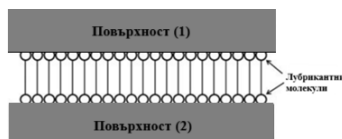
Химията на трибо-повърхностите изследва процесите, протичащи при контакт между повърхности и тяхната взаимодействие с околната среда (течности, газове, вакуум). На повърхността на материала възникват явления като адсорбция, дифузия, адхезия, повърхностни сили и химични реакции. Тъй като повърхностните атоми имат различно химично състояние от обемните, те са по-реактивни, а адсорбцията често е ключова стъпка в тези процеси [32, 33].

1.4.1. Адсорбция

Адсорбцията представлява прилепване на атоми, йони или молекули към повърхността на материал (адсорбент), като се различава от абсорбцията, при която частиците навлизат в обема. Различават се два основни вида: физисорбция – посредством слаби сили на Ван дер Ваалс, и хемисорбция – чрез химични връзки между адсорбат и адсорбент. В трибологията, особено при гранично смазване, адсорбцията и последващите повърхностни реакции играят ключова роля за ефективността на смазочните материали и добавки [34].

1.4.2. Гранично смазване

Граничното смазване възниква при екстремни условия – високи натоварвания и/или ниски скорости – при които смазочният филм е много тънък (няколко молекулни слоя). Образуването му се основава основно на адсорбция, а трибохимичните реакции определят състава и защитните свойства на филма върху трибо-повърхностите [35]. Според теорията на монослоя, адсорбираните и ориентирани молекули предотвратяват директен контакт между повърхностите и намаляват триенето поради ниската им якост на срязване, както е показано на фиг. 1.15 [36].



Фиг.1.15. Илюстрацията на граничното смазване показва монослой от смазочни молекули, абсорбиран и ориентиран върху свързващите повърхности.

1.4.3. Повърхностен филм

Повечето метали и сплави образуват естествени оксидни филми във въздуха, а при различни условия могат да се формират и сулфидни, нитридни и хлоридни покрития [25]. Дебелината им обикновено е в наномасштаб и зависи от химичната реактивност на метала; например оксидният филм върху неръждаема стомана е само няколко нанометра [37]. Тези филми влияят на трибологичното поведение според своите химични и механични свойства: меките залепени филми действат като смазващ слой и разделят контактните повърхности, докато твърдите и крехки лесно се напукват и са по-малко ефективни.

1.4.4. Дифузия

В химията дифузията се отнася до движението на флуидни молекули в твърди, обикновено порести вещества. В трибологията дифузионното третиране (или процесът на дифузионно отгряване, DAP) означава модификация на повърхността чрез въвеждане на интерстициални или заместващи атоми от външен източник [38-40]. Често отгряването се използва за регулиране на микроструктурата и свойствата на материалите чрез нагряване над температурата на рекристализация, поддържане и бавно охлаждане.

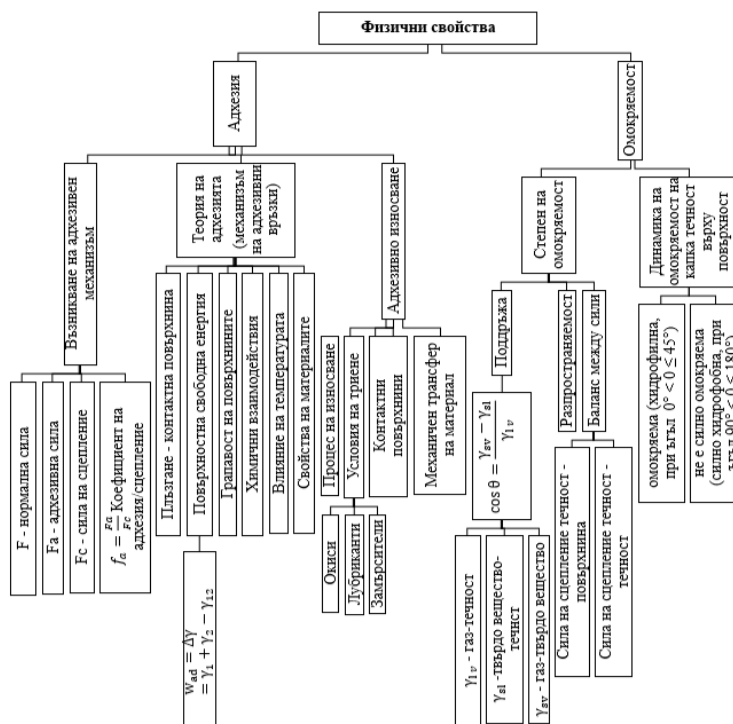
1.4.5. Повърхностна химия на MEMS

Повърхностните свойства на микроелектромеханичните системи (MEMS) са от съществено значение поради тяхното изключително високо съотношение повърхност–обем. Добре установено е, че контролирането на повърхностните сили – особено адхезията между контактните повърхности – представлява ключово предизвикателство при експлоатацията и поддръжката на MEMS устройства [41–44].

1.5. Физични свойства

В трибологията физичните свойства на материалите и повърхностите определят триенето, износването и смазването. Те влияят на контактите на атомно, микро- и макрониво, като ключови параметри са адхезия, грапавост, твърдост, топлинна и електрическа проводимост, вискозитет и др., които контролират ефективността на смазочните филми и точността на контактната механика.

Адхезията се описва чрез нормални и адхезивни сили, коефициент на сцепление, повърхностна енергия, атмосферни условия, окисление, триене и механичен трансфер на материал. Омокряемостта се характеризира чрез повърхностно напрежение и контактния ъгъл, като се разглеждат пълна и непълна омокряемост и динамиката на процеса при различни състояния на повърхността. Схемата на фиг.1.16 систематизира тези свойства и техните взаимовръзки, чрез формули и зависимости, характеризиращи поведението на материалите при контакт..

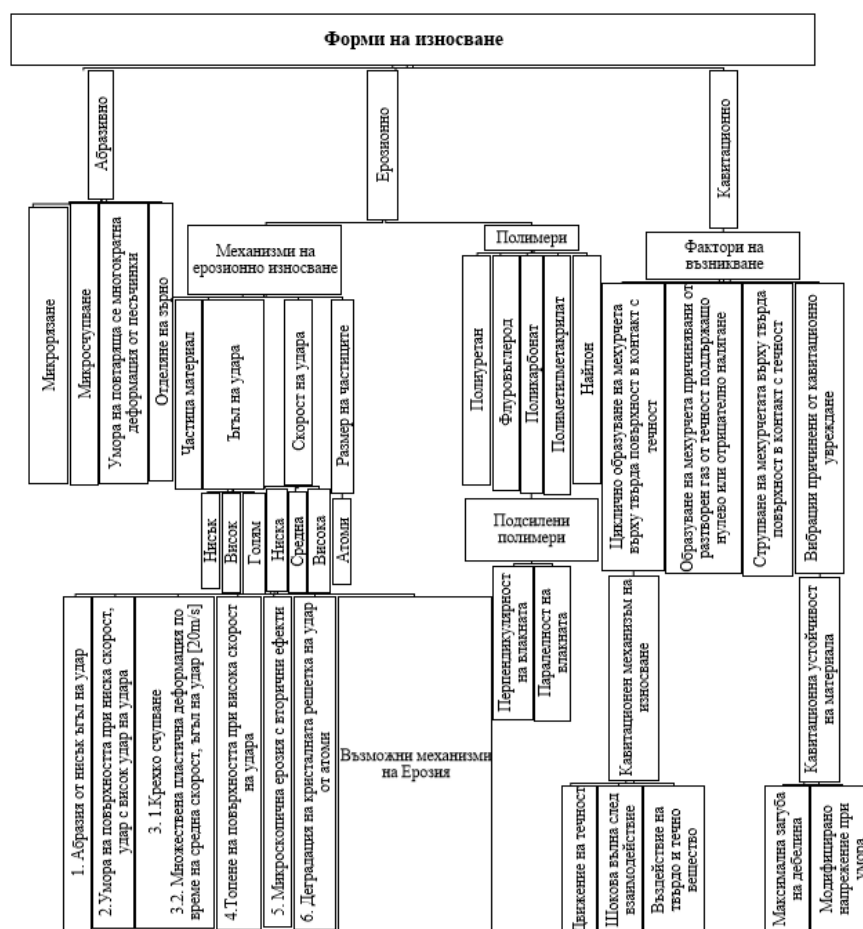


Фиг.1.16. Схема-класификация на физични свойства срещани в трибологията

1.6. Форми на износване

Износването чрез абразия, ерозия и кавитация възниква при взаимодействие между твърди частици или течности и повърхността на материал.

Тези процеси са сред най-агресивните механизми на износване, като различията в техните микромеханизми определят избора на материали и методи за повишаване на износоустойчивостта [45].



Фиг.1.19. Схема-класификация на формите на износване в трибологията

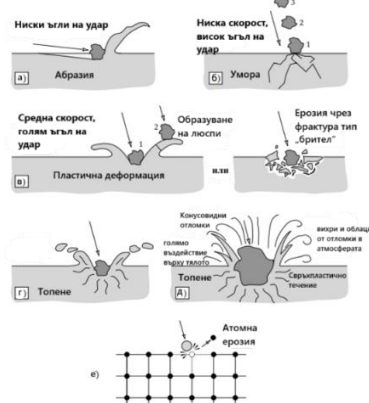
1.6.1. Абразивно износване

Абразивно износване възниква винаги, когато твърд предмет е натоварен срещу частици от материал, който имат еднаква или по-голяма твърдост. Често срещан пример за този проблем е износването на лопати на земекопни машини. Степента на абразивно износване е много по-голяма, отколкото може да се осъзнае. Всеки материал, дори ако по-голямата част от него е много мека, може да причини абразивно износване. Например, органичен материал, като захарна тръстика, е свързан с абразивно износване на резачки и шредери за тръстика поради малката фракция силициев диоксид, присъстващ в завода влакна [45].

1.6.2. Ерозионно износване

Ерозионното износване се причинява от удара на частици твърдо вещество или течност върху повърхността на обект. То се среща в голямо разнообразие от машини и типични примери са повреда на лопатките на газовата турбина, когато самолет лети през облаци прах и износване на помпени работни колела в системи за обработка на минерална суспензия. Подобно на други форми на износване, механичната якост не гарантира износоустойчивост и

подробно проучване на материала. Необходими са характеристики за минимизиране на износването. Известните механизми на ерозивно износване са илюстрирани в фиг.1.21.



Фиг. 1.21. Възможни механизми на ерозия: а) абразия при ниски ъгли на удар, б) умора на повърхността при удар с ниска скорост и висок ъгъл на удар, в) крехко разрушаване или многократна пластична деформация при удар със средна скорост и голям ъгъл на удар, г) топене на повърхността при високи скорости на удар, д) макроскопска ерозия с вторични ефекти, е) разграждане на кристалната решетка от удар от атоми.

1.6.3. Кавитационно износване

Известно е, че кавитационното износване уврежда оборудване като витла или лопатки на турбини, работещи в мокра пара, и седалки на клапани. Износването прогресира чрез образуването на поредица от дупки или ями на повърхността, изложена на кавитация. Целият компонент на машината може да бъде унищожен от този процес. Работата на оборудването, например витлата, често е ограничена от силни вибрации причинени от кавитационно увреждане.

1.7. Заключение

От анализа на трибологията като интердисциплинарна наука става ясно, че тя има ключова роля за съвременната индустрия и икономика. Чрез оптимизиране на триенето, износването и смазването, трибологията подпомага подобряването на производствените процеси, устойчивото използване на ресурсите и намаляването на отрицателното въздействие върху околната среда. Инвестициите в трибологични изследвания и технологии се изплащат дългосрочно, като допринасят за по-екологични и рентабилни решения.

Класификацията на трибологията според основни принципи, приложения, механични и физични свойства, химични взаимодействия на трибоповърхности и форми на износване създава важна основа за оптимизиране на индустриалните системи. Изследването на силите и коефициентите на триене позволява повишаване на ефективността, намаляване на разходите за поддръжка и разработване на иновативни решения.

Технология на трибологичните изследвания. Устройства и експериментално оборудване.

Експерименталните трибологични изследвания представляват съвкупност от методики, устройства и процедури, чрез които се оценяват основните параметри на триенето, износването и смазването. Те са от съществено значение както за разработването на нови материали и повърхностни покрития, така и за оптимизацията на съществуващи инженерни решения в машиностроенето, енергетиката, автомобилната индустрия и биомедицината.

2.1. Съществуващи методи и видове трибологични изследвания на полимери и композити

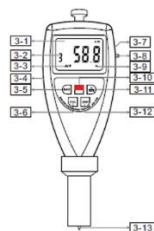
Трибологичните изследвания изучават триене, износване и смазване между повърхности, с цел оценка на издръжливостта на материалите и оптимизация на системите. Те се провеждат в лаборатории с трибометри и специализирани установки за контрол на натоварване, скорост и условия на околната среда.

2.2. Устройства за изследване на микротвърдостта на полимерни материали

Твърдостта на пластмасата показва способността ѝ да устои на натиск и количествено отразява степента на мекота или твърдост. Макар да не съответства пряко на други механични свойства, тя е важен показател за контрол на качеството. Най-често се използват методите по Шор и Рокуел, като Шор е най-разпространен в каучуковата и пластмасовата промишленост. Други популярни методи включват Викерс, Кнуп, Бринел и Мос, като изборът зависи от специфичните нужди и приложение на материала [46].

Използвани апаратури за изследване на твърдостта на полимери и композити в дисертационния труд са:

- *Instruction Manual Digital Shore Hardness Tester SAUTER HD* - Дигиталният уред за измерване на твърдост по Shore SAUTER HD (фиг. 2.3) е електронен инструмент за определяне на повърхностната твърдост на еластомери, гуми, пластмаси, меки полимери и други нетвърди материали. Той измерва дълбочината на проникване на индентор при зададена сила, като резултатът се отчита на цифров дисплей в единици Shore (A или D според модела).



Фиг.2.3. Описание на предния панел

3-1 Дисплей; 3-2 Брой измервания в състояние на средна стойност; 3-3 Индикатор за средна стойност; 3-4 RS 232 интерфейс; 3-5 макс. бутон HOLD; 3-6 бутон CAL; 3-7 Капак на батерията; 3-8 Пръстен за китка; 3-9 Състояние на средна стойност; 3-10 Бутон за захранване; 3-11 Бутон N/ Средна стойност; 3-12 Бутон за нулиране; 3-13 Сензор (индентор).

- *Твърдомер EBP BRV-187.5T*- За изпитванията на твърдост е използван дигитален универсален твърдомер EBP BRV-187.5T, изобразен на фиг.2.4., способен да извършва тестове

по методите на Бринел, Рокуел и Викерс. Уредът работи с диапазон на изпитвателната сила от 5 kgf до 187.5 kgf, като прилага затворен цикъл с високо-прецизна товарна клетка, което осигурява точно дозиране на натоварването без необходимост от физически тежести.



Фиг.2.4 Твърдомер EBP BRV-187.5T [47]

Управлението и отчетът на резултатите се извършват чрез 8-инчов тъчскрийн, а оптичната система включва микроскоп с обективи 2.5×, 5× (опция: 10×, 20×) и окуляр 15×, осигуряващи увеличение до 75× и минимална разделителна способност 0.1 μm. Уредът отговаря на стандартите ISO 6508, ASTM E-18, ISO 6506, ASTM E10, ISO 6507, ASTM E92 и позволява измервания в диапазона 8–650 HBW, 20–100 HR, 8–2900 HV.

2.3. Апаратура за изследване на коефициента на възстановяване - високоскоростна камера NAC MEMRECAM HX6

В изследването за определяне параметрите на коефициентът на възстановяване се използва високоскоростна камера и специализиран софтуер към нея. Това прави възможно измерване на всички параметри на отскока на сфера с диаметър 9 mm пусната върху плочка 60/60/10 mm, описани по-долу в дисертационния труд. На фиг.2.7 е изобразена високоскоростната камера NAC MEMRECAM HX6 [48].



Фиг.2.7 Високоскоростна камера NAC MEMRECAM HX6

Камерата разполага с 32 GB вътрешна памет, CMOS сензор с максимална резолюция 2560×1920 px при 1000 fps, външна синхронизация, 3 сменяеми обектива (вкл. варио), температурна калибровка и допълнително осветление от два 1 kW прожектора. Управлява се чрез специализиран софтуер и поддържа USB и Ethernet интерфейси, дистанционно управление и локален playback.

Някои от областите и приложенията, за които се използва NAC MEMRECAM HX-6, включват: Балистика и тестове на снаряди; Взривни и пиротехнически изпитания; Тестове на материали, деформации; Поточно флуидно визуализиране (например PIV – Particle Image Velocimetry); Оптична синхронизация и измервания с висока времева точност; Възможност за сегментирано записване — камерата може да записва в два различни сегмента с различни настройки едновременно.

2.4. 3D технологии, материали и устройства за печат

Адитивното производство е процес за създаване на триизмерни обекти по цифров модел чрез последователно нанасяне на материал слой по слой. С дебелина на слоя 16–180 μm,

технологията осигурява бързо и икономично изработване на детайли, прототипи и отливки, като замества традиционни методи като струговане и леене.

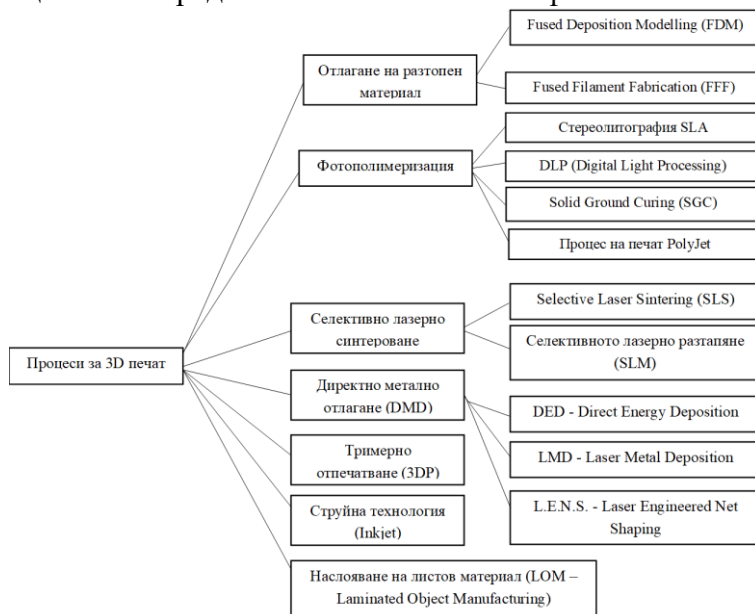
Качеството на детайла зависи основно от: дебелината на слоя, ъгъла и шаблона на запълване, ориентацията на отпечатването.

Чрез оптимизация на тези параметри се постига по-висока точност, здравина и добър външен вид на детайла [49, 50].

Най-широко използваните процеси за 3D печат на пластмаси са:

- FDM (Fused Deposition Modelling) – екструзия на стопена термопластична нишка слой по слой.
- SLA (Stereolithography) – втвърдяване на течна смола чрез фотополимеризация с лазер.
- SLS (Selective Laser Sintering) – лазерно синтерование на термопластичен прах.

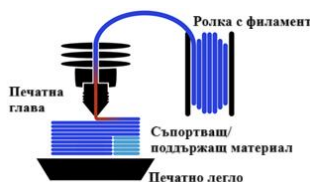
Технологичните процеси са представени схематично на фиг. 2.8.



Фиг.2.8. Схема на процесите за 3D печат

2.4.1. Отлагане на разтопен материал (FDM или FFF)

3D принтерите, работещи по принципа Fused Deposition Modelling (FDM), стопяват и екструдират термопластична нишка, която дюзата нанася слой по слой в зоната на изграждане [49, 51]. Технологията е показана на фиг. 2.9..



Фиг. 2.9. FDM - Диаграма на печат слой по слой

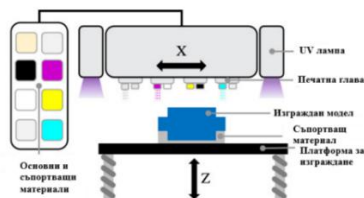
2.4.2. Фотополимеризация - Стереолитография (SLA), DLP (Digital Light Processing) и процес на печат PolyJet

Стереолитография (SLA) - тя е високоточна 3D печатна технология, при която UV лазер втвърдява фотополимерна смола слой по слой чрез фотополимеризация. 3D моделите се подготвят чрез CAD и се конвертират във файлове STL/OBJ. Смолите съдържат мономери, олигомери и фотоинициатори, които при UV облъчване формират омрежена структура [50,51].

Дебелината на слоя е около 100 μm , а времето за втвърдяване – 3–15 s. След печат изделията се почистват и подлагат на допълнително UV втвърдяване [52]. SLA се използва в медицината, тъканното инженерство и индустриалното прототипиране [53–54].

Ограниченията включват използването на епоксидни/акрилатни смоли с висок въглероден отпечатък и трудното им рециклиране, което стимулира разработването на биоразградими алтернативи [52–55].

PolyJet - PolyJet е високоточна 3D технология за фотовтвърдяване на полимери с резолюция до 0,014 mm, позволяваща комбиниране на различни материали [56]. Използва се за изработка на гладки и детайлни прототипи, медицински модели и функционални части. Процесът е представен схематично на фигура 2.10.

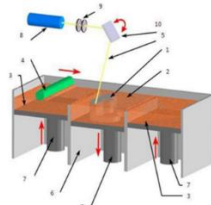


Фиг. 2.10. Илюстрация на 3D печат PolyJet

2.4.3. Селективно лазерни процеси

Селективното лазерно синтероване (SLS) е технология за 3D печат, при която лазер синтерова прахообразен материал, най-често найлон, слой по слой според 3D модел [57]. Всеки слой прах се разпръсква върху нагрятата платформа и се синтерова в избраните зони, като процесът се повтаря до изграждане на целия обект [57, 58].

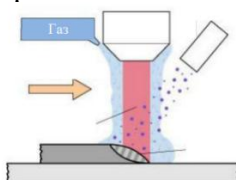
На Фигура 2.11 се представя общият вид на технологичния процес при селективното лазерно синтероване. 1 - Изграждан модел; 2 - Прахообразен материал; 3 - Бункери за хранене с прахообразен материал; 4- Валяк, разпределящ равномерно прахообразния материал; 5 - Лазерен лъч; 6 - Бункер, в който се изгражда модела; 7 - Бутала, движещи се по ос Z; 8- Лазерен източник; 9 - Лещи; 10 - Огледало, направляващо лъча по X и Y.



Фиг. 2.11 Общ вид на технологичния процес при SLS

2.4.4. Директно метално отлагане (DMD)

Директното метално отлагане (DMD), известно още като Direct Metal Deposition, представлява адитивна производствена технология за изграждане и ремонт на метални детайли чрез насочено подаване на метален прах или тел в зона на разтопяване, създадена от високоенергиен лазерен или електроннолъчев източник [59]. Тази техника обхваща няколко разновидности, обединени под термина Direct Energy Deposition (DED), като Laser Metal Deposition (LMD), Laser Engineered Net Shaping (LENS) и други [60]. На фиг.2.13 е представен общият вид на технологичния процес при DMD.



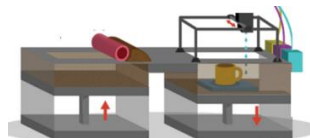
Фиг. 2.13 Общ вид на технологичния процес при DMD

2.4.5. Триммерно отпечатване (3DP)

Триизмерното отпечатване (3DP) е адитивна производствена технология, разработена в Масачузетския технологичен институт (MIT) в САЩ през началото на 90-те години [61]. Методът се основава на принципа на инжекционно свързване, при който върху слоеве от прахообразен материал се впръсква свързващ агент чрез дюза, подобно на струйните принтери. След като свързващото вещество се нанесе, частиците се слепват, а несвързаният материал остава като запълваща среда и може да бъде повторно използван [62].

На фиг.2.14 е показана технологична схема на процеса. След завършване на изграждането на модела, той се изважда от бункера с прахообразен материал, почиства се от излишния прах и се изпича в печ. Това подобрява механичните качества на детайла.

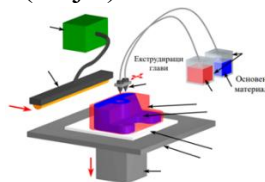
При този метод няма нужда от поддържаща структура, тъй като несвързаният прахообразен материал изпълнява тази функция.



Фиг.2.14 Технологична схема на 3DP процеса

2.4.6. Струйна технология (Inkjet)

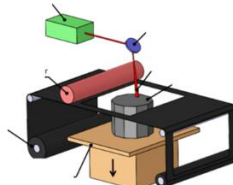
При този метод се използва екструдиреща глава с две дюзи – за основен и за поддържащ материал [63]. Основният материал, често восъкоподобен полимер, се загрява до течено състояние и се нанася под формата на фини капчици върху подложката, където веднага се втвърдява. Поддържащият материал се нанася по същия начин. Създаденият слой се фрезова до желаната дебелина, след което работната платформа се спуска с височина, равна на слоя, и процесът се повтаря до завършване на обекта. На фиг. 2.15 е представена технологичната схема на процеса със струйна технология (Inkjet).



Фиг. 2.15 Технологична схема на Inkjet процеса

2.4.7. Наслявяване на листов материал (LOM – Laminated Object Manufacturing)

Методът на наслявяване на листов материал (LOM) включва последователното наслагване на слоеве от листов материал (например хартия) с помощта на свързващо вещество. В този процес всеки слой се изрязва и оформя с помощта на лазерен лъч. Дебелината на всеки слой зависи от дебелината на използвания листов материал. Освен контурите на слоя, лазерният лъч нарязва излишния материал на форма на квадрати [64]. Технологичната схема на LOM процеса е показана на фиг. 2.16.



Фиг. 2.16. Технологична схема на LOM процеса [64]

2.4.8. 3D технологии използвани в изследването

В настоящия дисертационен труд бяха използвани следните 3D технологии за печат:

- **3D принтери с FDM технология на печат: TEVO Tornado** (фиг.2.17); Ultimaker S5(фиг.2.18); Bambu Lab P1S (фиг.2.19). В таблица 2.1 са представени характеристиките на принтерите, използвани в настоящия труд.



Фиг. 2.17. 3D TEVO Tornado



Фиг. 2.18 3D Ultimaker S5



Фиг. 2.19 3D Bambu P1S

Таблица 2.1. Характеристики на използваните 3D принтери работещи с FDM процес

Принтер	TEVO Tornado	Ultimaker S5	Bambu Lab P1S
Габаритни размери на принтера	560 x 600 x 620 mm	W 495 x D 585 x H 780 mm	389 × 389 × 458 mm
Брой екструдери	1	2	1
Размер на леглото за печат	300 x 300 x 400 mm	330 x 240 x 300 mm	256 x 256 x 256 mm
Максимална площ за печат	300 x 300 x 400 mm	330 x 240 x 300 mm	256 x 256 x 256 mm
Максимална скорост на печат	150 mm/sec	< 24 mm ³ /c (build speed)	500 mm/sec
Разделителна способност на слоя	50 microns (0.05 mm)	0.25 mm дюза: 60–150 μm; 0.4 mm: 20–200 μm; 0.6 mm : 20–300 μm; 0.8 mm : 20–600 μm	0.08 – 0.28 mm
Диаметър на нишката за печат	1.75 mm	2.85 mm	1.75 mm
Диаметър на дюзата	0.4 mm	0.25 mm, 0.4 mm, 0.6 mm, 0.8 mm	0.4 mm (стандартна), опции 0.2 / 0.6 / 0.8 mm
Максимална температура на екструдера	260° C	180 - 280 °C	300 °C
Температура на нагревателната плоча	60 – 110 ° C	20 – 140 °C	100 °C
Връзка	TF card или USB	Wi-Fi (2.4 GHz), Ethernet, USB	microSD, Wi-Fi, Bluetooth
Файлови формати	STL file, G-code	UltiMaker Cura: STL, OBJ, X3D, 3MF, BMP, GIF, JPG, PNG Printable formats: G, GCODE, GCODE.gz, UFP	G-code (през Bambu Studio и поддържани slicers)
Съвместимост	Windows, Linux, Mac	PLA, Tough PLA, Nylon, ABS, CPE, CPE+, PC, TPU 95A, PP, PVA, Breakaway и др.	PLA, PETG, TPU, ABS, ASA, PA (Nylon), PC, PVA, PET; препоръчан до 300 °C; въглеродни/стъклени нишки — не се препоръчват без ъпгрейд на екструдера

- **PolyJet технология на печат - Stratasys Objet260 Connex3**

3D принтерът Stratasys Objet260 Connex3 работи по технология PolyJet, която се отличава с изключително висока точност и възможност за комбиниране на различни материали и

цветове в един печатен процес[65]. В таблица 2.2 са изложени основните параметри и характеристики на Stratasys Objet260 Connex3 [66-70].

Таблица 2.2 Параметри на 3D принтер Stratasys Objet260 Connex3.

Параметър	Стойност
Размер на работна камера (Build Volume)	255 × 252 × 200 mm
Минимална дебелина на горен слой	хоризонтални слоеве до ~ 16 микрона (0.016 mm)
Резолуция / DPI по оси	X-ос: 600 dpi; Y-ос: 600 dpi; Z-ос: 1600 dpi
Точност	~ 20-85 μm за характеристики под 50 mm; до 200 μm за цели модели (в зависимост от геометрия, ориентация и зададени параметри)
Материали	- Моделни фотополимери: Vero серия (твърди, прозрачни, цветни), Tango / Agilus (гуменоподобни), Digital ABS, симулиран полипропилен (Rigur, Durus), високотемпературни и био-съвместими материали - Поддържащ материал: SUP705 (премахва се чрез водоструйка) и SUP706 (разтворим)
Режими на печат	<i>High Quality</i> — с минимален слой (~16 μm) <i>Digital Material</i> и <i>High Speed</i> — с по-големи слоеве (~30 μm) в зависимост от нуждата от производителност или качество
Размер на машината / тегло	Машина: ~ 87 × 120 × 73.5 cm; ~ 264 kg Кабинет за материали: ~ 33 × 117 × 64 cm; ~ 76 kg
Захранване	110-240 VAC, 50-60 Hz (~ 1.5 kW)
Условия на работа	Температура: 18-25 °C ; относителна влажност: 30-70% , без конденз

Принтерът Objet260 Connex3 разполага с печатаща глава, която позволява едновременно използване на до три материала в един обект, осигурявайки различни механични свойства, прозрачност и пълноцветен печат. Използват се моделни фотополимери (Vero, Tango, Digital ABS) за обекта и поддържащ материал (SUP705/706), който се премахва след печата.

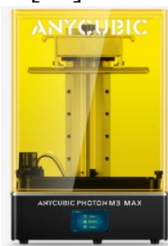
- **Anycubic Photon M3 Max** – технология на печат MSLA (Masked Stereolithography Apparatus)

3D принтерът Anycubic Photon M3 Max използва технологията MSLA (Masked Stereolithography Apparatus), известна още като LCD-базиран стереолитографски печат [71-75]. В таблица 2.3 са представени параметрите на 3D принтера.

Таблица 2.3 Параметри на Anycubic Photon M3 Max

Параметър	Стойност
Технология на печат	LCD / MSLA (Masked Stereolithography)
Размер на екрана	13.6" монохромен LCD
Резолуция на екрана	6480 × 3600 пиксела (7K)
X-Y резолуция	46 μm
Точност по Z-оста	10 μm
Размер на печатната площ	300 × 298 × 164 mm (H × D × W)
Обем на печат	14.7 литра
Скорост на печат	до 60 mm/h
Система на осветление	Anycubic LightTurbo с 84 LED елемента
Контролен панел	4.3" цветен сензорен LCD
Входни данни	USB-A 2.0
Оценена мощност	120 W
Платформа за печат	Лазерно гравирани за по-добро сцепление
Софтуер за рязане	Anycubic Photon Workshop
Допълнителни функции	Интелигентно попълване на смолата, защита на екрана с анти-надраскващо фолио

Технологията MSLA е особено подходяща за печат на детайли с висока разделителна способност и гладки повърхности, като се използват фотополимерни смоли (UV resins). Anycubic Photon M3 Max (Фиг.2,20) е оборудван с 13.6-инчов монохромен 7K LCD дисплей и усъвършенствана UV светлинна матрица (Light Matrix 3.0), осигуряваща равномерно осветяване и висока точност на детайлите [71].



Фиг.2.20 3D принтер Anycubic Photon M3 Max

2.5. Полимери и композити за 3D печат

3D печат чрез FFF позволява изработка на полимерни и композитни материали с сложни геометрии и функционални детайли, недостижими с конвенционални методи. Често използвани са PLA, ABS, PA, PEEK и техни композити с въглеродни влакна, графит, графен или естествени пълнители, които повишават модул на еластичност, компресионна якост и твърдост, но при >15 wt.% се наблюдават агломерация и слаба междуслойна адхезия. Механичните свойства зависят силно от параметрите на печат (температура, дебелина на слой, ориентация на нишки, скорост), като материалите са анизотропни и якостта по Z оста е по-ниска от тази по XY. Трибологичните характеристики включват коефициент на триене, износване (абразивно, адхезионно, фретинг, уморно) и влиянието на структурата от 3D печат [76–78].

2.5.1. Видове пластмаси за 3D печат

Има два основни вида пластмаси използвани при 3D печат – термопластмаси и термореактивни пластмаси [50].

1. *Термопластмасите* са най-често използваният вид пластмаса [50]. Основната характеристика, която ги отличава от термореактивните, е способността им да преминават през множество цикли на топене и втвърдяване.

2. *Термореактивните пластмаси* (наричани още термореактивни) остават в постоянно твърдо състояние след втвърдяване.

В Таблица 2.4 са обобщени данни от производители [79] и изчислени стойности, използвани в настоящото изследване.

- а) PLA $[(C_3H_4O_2)_n]$ лесен за печат, най-широко използван полимер; ниска температура на печат и малка склонност към деформация [50].
- б) ABS - по-здрав от PLA, но по-труден за печат; изисква загрято легло поради склонност към изкривяване [50].
- в) PETG - модифициран PET; здрав, устойчив, удобен за печат и често използван вместо PLA/ABS.
- г) TPE, TPU, TPC - Термопластичните еластомери (TPE) гъвкави, еластични материали. TPU е по-твърд и лесен за печат от TPE; TPC предлага по-добра UV/химична/топлинна устойчивост (до $\sim 150^\circ\text{C}$).
- д) Найлон - (полиамид) много здрав, гъвкав и устойчив на удари; хигроскопичен, може да се боядисва; използва се за функционални детайли.
- е) PC (поликарбонат) е много здрав, прозрачен и термоустойчив (до $\sim 110^\circ\text{C}$); подходящ за технически и автомобилни детайли.

Таблица 2.4 Характеристики на използваните филаменти

Материал	Температура на топене	T° на печат на глава – nozzle	T° на работна зона /легло/- bed	Speed	cooling	Якост на опън	Якост на огъване	Flexural modulus	Hardness	Плътност на материала	Плътност на материала на проба - експериментално			
											Цилиндър - 100% запълване	Плоча 120/60/10 - 20% запълване	Плоча 60/60/10 - 20% запълване	Сфера 9mm - 20% запълване
	°C	°C	°C	mm/s	°C	[MPa]	[MPa]	MPa		[g/cm³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]
PLA (silver)	-	210- 230°C	45-60°	40- 100	-	63	74	1973	-	1.24	1145.91559	-	-	-
3DJAKE PETG	-	230-250	60-90	20-200	15-25°	61	68	2050	-	1.29	1145.91559	-	-	857.89
ColorFabb SteelFill	-	190-210	50-60	40-80	On	23	30	3000	-	3.13	2801.127	-	-	2786.84
Carbon Fil	-	± 230 - 265°				52.5	-	± 4600	109	1.19	1082.25361	-	-	1134.21
3DJAKE TPU A95	190 ± 10	200 – 230	60-90		15-25°	55	-	2303	95A	1.20	-	-	352.77	686.84
EasyFil™ HIPS (blue)	± 180 - 260° C	± 220 - 260	0-60	-	-	22	± 51.2		-	1.04	-	-	-	565.26
EasyFil™ HIPS (black)	± 180 - 260	220 - 260°	0-60	-	-	22	± 51.2	± 2126	-	1.04	-	-	416.666	703.15
ABS	235 ± 10	235 – 255	± 80	-	15-25	43.6	-	-	-	1.1	-	-	-	-

ж) Екзотични нишки за 3D печат (Хибридни материали) - смеси от основен полимер (обичайно PLA) и добавки като метал, дърво, керамика, въглеродни/стъклени влакна; дават специфични свойства и повърхности.

з) Композити - те повишават здравината при ниско тегло. Укрепването се осъществява чрез къси или непрекъснати влакна, най-често въглеродни, както и стъклени или кевларови.

В таблица 2.5 са разгледани най-често използваните филаменти и техните характеристики.

Таблица 2.5 Видове филаменти за 3D печат

Вид	Сила	Гъвкавост	Издръжливост	Трудност при използване	Температура на печат	Температура на леглото за печат	Изкривяване	Разтворимост	Безопасност за храните
PLA	Висока	Ниска	Средна	Ниска	180°- 230°	20°-60°	Минимално	Не	Указания на потребителя
ABS	Висока	Средна	Висока	Средна	210°- 250°	80°-110°	Значително	В естери, кетони и ацетон	Не
PETG	Висока	Средна	Висока	Ниска	220°- 250°	50°-75°	Минимално	Не	Указания на потребителя
TPE, TPU, TPC	Средно	Много висока	Много високо	Средна (TPE, TPC); Ниско (TPU)	210°- 230°	30° – 60°	Минимално	Не	Не
НАЙЛОН	Висока	Висока	Висока	Средна	240°- 260°	70°-100°	Значително	Не	Указания на потребителя
PC	Много висока	средна	Много висока	Средна	270 °- 310°	90°-110°	Значително	Не	Не

2.5.2. Видове смоли за 3D печат

Смолата е UV-втвърдяваща се фотополимерна течност, използвана основно при SLA, DLP и PolyJet 3D печат. Под действие на светлина тя се втвърдява слой по слой, осигурявайки модели с висока детайлност и гладка повърхност. Предлагат се разнообразни смоли с различни свойства: стандартни, твърди, водоразтворими, дентални, гъвкави, за леене, термоустойчиви, както и оцветители и аксесоари.

2.6. EDEM Software

EDEM е софтуер за симулация, специално проектиран за обработка на дискретни елементи, който се използва широко в инженерството и изследователската работа. Той е особено ефективен при анализ на механични системи, свързани с динамиката на частици. Подходящ е за симулация на 3D отпечатани проби и изчисляване на коефициенти на триене при плъзгане, триене при търкаляне и реституция [80-85].

За симулационното моделиране е използван софтуерен продукт, работещ по метода на дискретните елементи – EDEM Software. Програмният пакет включва модули за: изграждане на модели на обекти EDEM Creator, симулация на взаимодействие между много обекти EDEM Simulator, анализ на резултати, графики, отчитане на ъгли, брой мелещи тела, износване и др. EDEM Analyst [80-85].

2.7. Заключение

Трибологичните изпитвания осигуряват данни за проектиране, оптимизация на материали, повърхностни обработки и удължаване на живота на компонентите. Изпитването за твърдост по Рокуел е важно за определяне на механичните свойства на меки материали при спазване на стандарти. Съвременната трибология се свързва с 3D печат на полимери и композити, което позволява бързо прототипиране и по-точна прогноза за поведението на материалите при реални условия.

Различните технологии за 3D печат имат специфични предимства:

- FDM (Fused Deposition Modeling) – най-достъпната и широко използвана технология, подходяща за прототипи и функционални изделия от термопластични полимери. Позволява бързо производство, но точността и повърхностната гладкост са ограничени.
- PolyJet – технология с висока резолюция, която позволява комбиниране на различни материали и твърдости в един детайл. Идеална за детайлни модели, медицински приложения и изделия, изискващи еластични свойства.
- SLA (Stereolithography) и DLP (Digital Light Processing) – осигуряват изключително висока точност и гладки повърхности чрез използване на фотополимерни смоли. Широко приложими в денталната медицина, протезирането и изделия с високи естетически изисквания.
- SLS (Selective Laser Sintering) – използва полимерни прахове, създавайки здрави и функционални детайли, подходящи за индустриални приложения. Не изисква допълнителни поддържащи структури.
- SLM (Selective Laser Melting) и DMLS (Direct Metal Laser Sintering) – технологии за метален 3D печат, позволяващи създаването на сложни и изключително здрави компоненти за авиация, автомобилостроене и медицински импланти.
- MJF (Multi Jet Fusion) – предлага висока скорост на печат, добра детайлност и отлични механични свойства, което го прави подходящ за серийно производство на пластмасови части.
- Binder Jetting – използва свързващи вещества върху прахови материали, което позволява нискоразходно производство на сложни форми и детайли.

Съчетаването на трибологичните изследвания с тези технологии е ключово за правилната оценка на новите материали – особено полимерите и композитите, които заемат все по-голямо място в производството. Това позволява не само оптимизация на процесите, но и прогнозиране на дълготрайността и поведението на изделията в реални условия на експлоатация.

Глава 3.

Съставяне на методики за провеждане на изследванията

Настоящата глава представя разработването и обосновката на методиките, използвани при експерименталните изследвания на 3D отпечатани полимерни и композитни материали. Целта е осигуряване на прецизни, възпроизводими и научно обосновани резултати. Всяка методика е съобразена с характеристиките на материалите, целите на изследването и техническите възможности на използваната апаратура, описана в глава 2.

3.1. Методики за 3D принтиране

Методиките за 3D печат се адаптират спрямо вида на принтера, технологията за печат, геометрията и особеностите на детайла, както и целта на изработката.

I. FDM технология на печат

Методиката за FDM 3D печат започва със създаване на CAD модел, експортиран в STL формат, който се слайсва в софтуер за генериране на G-код. В зависимост от серията, G-кодът се прехвърля към принтера чрез SD карта (Tevo Tornado) или мрежова връзка (Ultimaker S5). Преди печат леглата се нивелират, а дюзите се почистват. Печатът протича слой по слой чрез екструдирание на материала. След приключване на процеса моделът се отстранява, извършва се пост-обработка и се проверява за дефекти и съответствие със спецификациите.

II. Stratasys objet 260 Connex3 - Технологията PolyJet

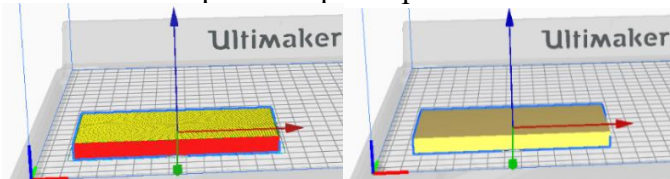
Изработване на пробите с PolyJet технология (Stratasys): 3D моделите бяха създадени в CAD и експортирани в STL, проверени за коректност и ориентирани за оптимална точност. Файловете бяха подготвени в GrabCAD Print/Objet Studio с избор на фотополимер (Vero/Tango/Digital ABS), режим High Quality и автоматично генериране на поддържащ материал. Принтерът беше настроен, проверени бяха касетите и печатащите глави, а печатът се извърши слой по слой (16–30 μm) с UV втвърдяване. Поддържащият материал бе отстранен механично или чрез алкален разтвор с ултразвук, последвано от изплакване и сушене.

III. Anycubic Photon M3 Max - LCD/SLA технология

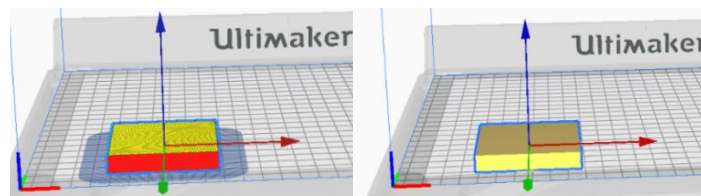
Изработка на образците с Anycubic Photon M3 Max (LCD/SLA): 3D моделите бяха създадени в CAD и експортирани в STL. В софтуера Anycubic Photon Workshop се задаваха ориентация, качество на слоя и поддържащи структури. Печатът се извършва слой по слой чрез UV втвърдяване на фотополимера. След отпечатване моделите се почистват с изопропилов алкохол и се до-втвърдяват с UV светлина чрез Anycubic Wash and Cure 3 Plus.

3.1.1. Съставяне на методика за 3D принтиране на плочки

Геометричните плочки бяха създадени в 3D Builder (Microsoft) като правоъгълни паралелепипеди с размери 120×60×10 mm и 60×60×10 mm (фиг.3.1 и фиг.3.2), след което преминаха през подготовка за печат и реално принтиране.



Фиг. 3.1. Моделиране на плочка с размер 120/60/10 mm.

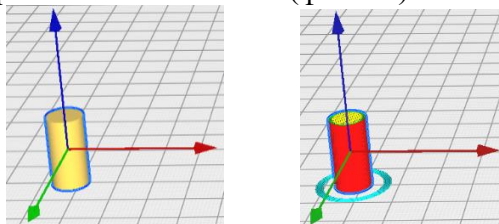


Фиг. 3.2. Моделиране на плочка с размер 60/60/10mm.

Геометричните плочки (120×60×10 mm и 60×60×10 mm) бяха създадени в 3D Builder и експортирани като STL. В Ultimaker Cura моделите бяха позиционирани хоризонтално, със слой 0.2 mm, 20% запълване, „Zig-Zag“ или „Triangles“ схема, подходяща температура за дюза и легло, скорост ~50 mm/s и активирана Brim/Skirt. След настройките беше генериран G-code за принтера.

3.1.2. Съставяне на методика за 3D принтиране на цилиндри

За изследване на трибологичните свойства на използваните филamenti бяха подготвени цилиндрични проби с размери $h=20\text{mm}$ и $r=5\text{mm}$ (фиг.3.3).



Фиг. 3.3 Моделиране на цилиндри в софтуерна среда

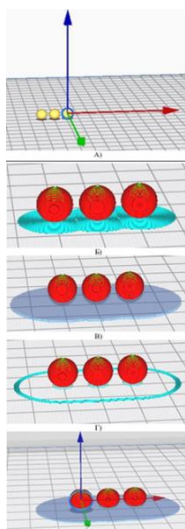
Методиката за 3D принтиране на цилиндрични образци включва създаване на CAD модел, конвертиран в STL формат за слайсинг. Използват се материали PLA, SteelFeel или CarbonFill с оптимизирани параметри – дебелина на слоя 0,1–0,2 mm, температура на дюзата и платформата, 100% запълване и подложка (brim или raft). Поради простата геометрия на цилиндъра не са нужни опори. Експерименталният образец има височина 20 mm и радиус 5 mm.

3.1.3. Съставяне на методика за 3D принтиране на сферични тела

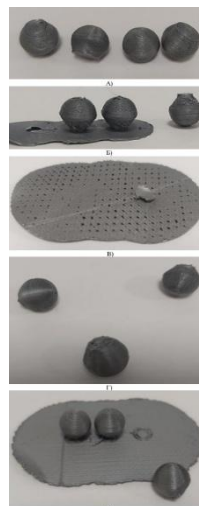
Методиката за 3D принтиране на сферични образци включва създаване на CAD модел, конвертиран в STL формат, и отпечатване чрез FDM с оптимизирани параметри – дебелина на слоя, температура и ориентация на обекта. Поради стъпаловидния ефект и ограничената опорна площ се използват опори, а понякога се прилага SLA технология. Използвани са материали PLA, SteelFeel и CarbonFill с 100% запълване. Сферите с диаметър 9 mm се отпечатват по три едновременно, след което опорите се отстраняват и обектите могат да се обработват допълнително. На фигури 3.4 и 3.5 са показани сферите с пет вида подложки – без, Brim, Raft, Skirt + Support и Raft + Support, а данните за материал и време са обобщени в Таблица 3.1.

Таблица 3.1. Количество използван материал и време за печат

	Tevco Tornado		Ultimaker S5	
Тип „подложка“	Време, min	К-во суровина, g	Време, min	К-во суровина, g
None	19	1	10	1
Brim	20	2	13	1
Raft	27	3	18	2
Raft support	30	3	20	2
Skirt support	20	2	12	1



Фиг. 3.4 Моделиране на сфери с различни подложки: А) без подложка; Б) с подложка Brim; В) с подложка Raft; Г) с подложка Skirt + Support; Д) с подложка Raft +Support с която се отпечатаха



Фиг. 3.5 Отпечатани сфери с различни подложки: А) без подложка; Б)с подложка Brim ; В)с подложка Raft; Г)с подложка Skirt + Support; Д)с подложка Raft +Support

3.2. Методика за анализи на микротвърдостта на полимери и композити

За изследванията са разработени три методики с апаратурите описани в глава 2, точка 2.2. Чрез изпитване със EBP BRV-187.5T и последващо измерване на отпечатъците с Olympus BX53M + DP23.

- **Instruction Manual Digital Shore Hardness Tester SAUTER HD**

Микротвърдостта по Шор измерва твърдостта на полимери и еластomers чрез съпротивлението на материала срещу проникване на твърд връх. Измерването се извършва с дигитален дурометър Sauter HD върху 3D отпечатани образци и се отчита в Шорови единици (Shore A, D и др.). Методът е подходящ за тънки и вискоеластични материали.



Фиг. 3.6 Уред за измерване на микротвърдостта по Шор.(описан в глава 2)

- **Твърдомер EBP BRV-187.5T** (описан в глава 2)

Преди изпитването се извършва калибрация и проверка на уреда. Натоварването и инденторът на твърдомера се проверяват с подходящи сертифицирани референтни блокчета (стоманени, никелови или полимерни), за да се потвърди правилното функциониране на товарната клетка и работата в затворен цикъл. Оптичната система се калибрира чрез сценичен микрометър, като за всеки използван обектив (10×, 20×, 50× и др.) се определя и записва съответният коефициент на преобразуване ($\mu\text{m}/\text{px}$).

За изпитването е избран метод Rockwell с индентор HRR/60/12.7, изпитвателна сила $F = 60 \text{ kgf}$ и време на натоварване 1 s. Уредът EBP BRV-187.5T е настроен в съответния режим,

работната зона е обезвибрена, а пробата – нивелирана хоризонтално, за да се осигури равномерно натоварване при индентирание.

3.3. Методика за изследване на трибологични свойства на полимери и композити получени чрез 3D принтиране

За целите на настоящия дисертационен труд се изследват получени чрез 3D печат, образци от полимерни и композитни материали, посредством разработени методики за изследване на коефициенти на триене при плъзгане, триене при търкаляне и коефициент на възстановяване, както следва:

1) Триене при плъзгане:

Кинетичното триене е контактната сила, която се съпротивлява на плъзгащото движение между обект и повърхност. То е обикновено по-малко от статичното триене, което улеснява движението на обекта след като то вече е започнало [86].

Силата на кинетичното триене се определя от:

$$F_k = \mu_k \cdot N \quad (3.1)$$

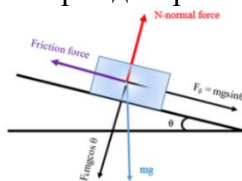
Където:

F_k е силата на кинетичното триене;

μ_k е коефициентът на кинетично триене;

N е нормалната сила.

Когато върху блок се приложи сила върху наклонена равнина, неговото ускорение зависи от съотношението между външната сила и кинетичната сила на триене. Блокът ускорява, ако външната сила превишава триенето, спира или забавя движението, ако триенето е по-голямо, и се движи с постоянна скорост при равенство между двете сили, според първия закон на Нютон. Принципът е показан на фиг. 3.7 чрез диаграма на свободното тяло.



Фигура 3.7 Диаграма на свободно тяло на блок, подложен на триене, докато се плъзга по наклонена повърхност [87]

Компонентът на гравитацията по посока на наклона се дава от:

$$F_g = mg \sin \theta \quad (3.2)$$

Където:

m е масата на блока,

g е гравитационното ускорение,

θ е ъгълът на наклона.

Нормалната сила (перпендикулярна на повърхността) се дава от:

$$N = mg \cos \theta \quad (3.3)$$

Следователно, тъй като силата на триене се противопоставя на движението на блока:

$$F_k = \mu_k \cdot mg \cos \theta \quad (3.4)$$

Коефициентът на кинетично триене върху наклонена равнина се изчислява, когато успоредната на повърхността сила, действаща върху блока, е равна на перпендикулярната сила. Това се наблюдава при фиксиран ъгъл θ , при който блокът се движи с постоянна скорост:

$$\Sigma F = ma = 0 \quad (3.5)$$

$$F_k = F_g \text{ or } \mu_k mg \cos \theta = mg \sin \theta \quad (3.6)$$

От горните уравнения следва:

$$\Sigma \mu_k = mg \sin \theta / mg \cos \theta = \tan \theta \quad (3.7)$$

Където θ е ъгълът, под който блокът започва да се движи с постоянна скорост [88].

2) Триене при търкаляне

Триенето при търкаляне възниква, когато обект се движи по повърхност и среща съпротивление, дължащо се на кинетичното триене в контактната точка. Теглото, грапавостта и еластичността на обекта и повърхността могат да предизвикат деформации, генериращи силата на триене [89].

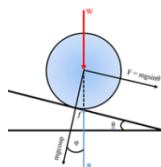
На фиг. 3.8 е показано триенето при търкаляне върху наклонена повърхност, като нормалната сила зависи от косинуса на ъгъла между масата и перпендикулярната на повърхността посока (формула 3.8):

$$Fr\theta = fW\cos\theta \quad (3.8)$$

Където:

Fr е силата на триене при ъгъл θ ;

θ е ъгълът на наклона;



Фигура 3.8 Триене при търкаляне [90]

3) Кофициент на възстановяване

За изследване влиянието на триенето и коефициента на възстановяване е разработена методика, при която 3D-принтирани сфери свободно падат върху плоски образци. Целта е определяне на коефициента на реституция, изчисляван като отношение между височината на отскока и височината на пускане. Сферите ($\varnothing 9\text{ mm}$) са изработени от HIPS, TPU, PLA, PETG, Carbon, Vero White и др., а за сравнение е използвана и стоманена сфера. Съответстващи плочки с размери $60 \times 60 \times 10\text{ mm}$ са отпечатани за всеки материал.

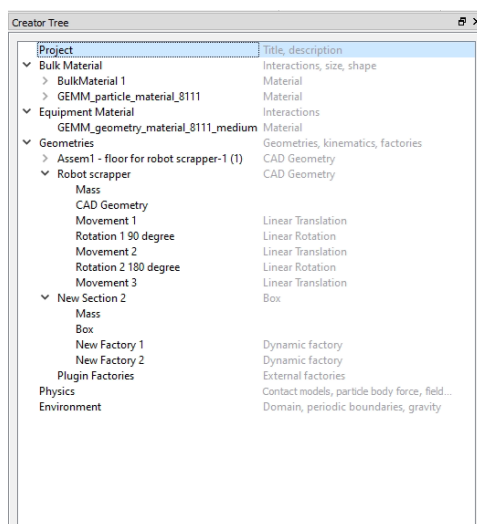
Пробите се пускат от височина 650 mm чрез направляваща тръба, а ударът се регистрира с високоскоростна камера NAC MEMRECAM HX-6 при 500 fps . С помощта на софтуер Vicasso 2009 се определя височината на първия отскок, като за всяка комбинация се правят три повторения и се усредняват резултатите.

Получените стойности на коефициента на реституция са представени в табличен вид (гл. 4, т. 4.1.3) и се използват като входни данни за симулации на движение на шлифовъчни тела в мелници. Това позволява по-точно моделиране на ключови параметри и оптимизация на енергийната ефективност на процеса.

3.4. Методика за създаване на симулация в среда на EDEM Software

В модула Creator на EDEM Software се задават входните параметри за симулационното моделиране, показани на фиг. 3.9. Процесът започва с дефиниране на материала на частиците (Bulk material), включително коефициенти на триене и триене при търкаляне, реституция, плътност и размери. След това се създава материал за оборудването (Equipment material). В секцията Geometries могат да се генерират геометрии директно в софтуера или да се вмъкнат съществуващи CAD модели [80–85], като им се задават действия като трансляция, ротация, скорост, ускорение и време на действие.

Следва създаване на Factory за генериране на частиците с предварително зададени свойства и количество (брой, маса или без лимит), както и параметри като време на производство, начало на генериране, контактни ограничения и др. За симулациите е избран стандартният модел за контакт Hertz-Mindlin.



Фигура 3.9 Входни параметри за симулационно моделиране.

За целите на симулационното моделиране с EDEM Software е създадена следната методика: Дефиниране на цел и задача; Дефиниране на частици – вид, големина, физични свойства; Дефиниране и позициониране на геометрия – вид, големина, физични свойства, избор на файлов формат; Дефиниране и позициониране на Factory за създаване на частици; Създаване на трасе; Създаване на модели за анализ на получените данни от симулацията.

Целта на симулационното моделиране е създаване на унифициран модел, по който да бъдат изследвани различни видове полимери и композити получени чрез 3D печат за изследване на коефициента на възстановяване. Задачите, които трябва да бъдат изпълнени са: създаване на частици, позициониране на геометрия, създаване на трасе и анализ на получените данни от симулационното моделиране.

3.5. Заключение

Трибологичните свойства на 3D принтирани полимери изискват допълнителни изследвания и оптимизация на производствените параметри за приложение в индустрии като автомобилната, авиационната, медицинската и строителната. Проведените изследвания показват потенциала на 3D принтираните полимери, като по-нататъшното развитие на технологиите ще подобри трибологичните им характеристики.

В настоящата глава са систематизирани методиките за експериментални изследвания на 3D отпечатани полимерни и композитни материали. Разработените подходи осигуряват възпроизводимост, последователност и висока надеждност на данните, позволявайки комплексна оценка на трибологичните и механичните свойства на образците.

Методиката за 3D принтиране гарантира висока геометрична точност и структурна еднородност на пробите, а анализът на микротвърдостта чрез Бринел и Шор осигурява прецизна оценка на локалните механични свойства. Методиката за трибологични изследвания позволява определяне на коефициенти на триене при плъзгане, търкаляне и възстановяване, като резултатите осигуряват надеждна база за валидиране на симулационни модели.

Симулационното моделиране в EDEM Software допълва експерименталните изследвания, позволявайки виртуални експерименти, прогнозиране и оптимизация на технологични параметри.

Обобщено, разработените методики формират интегрирана експериментално-аналитична система, осигуряваща съпоставимост между експериментални и симулационни резултати и предоставяща методологична основа за анализа и интерпретацията на резултатите, както и за оптимизация на технологичните процеси при 3D принтиране на полимери и композити.

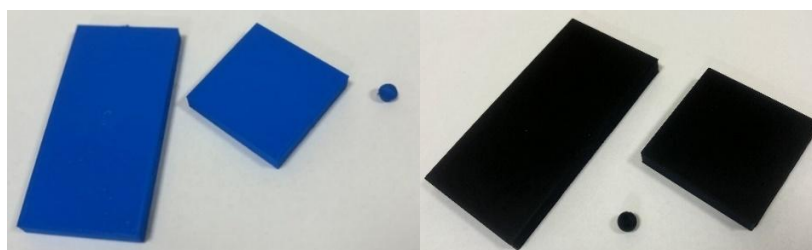
Глава 4.

Експериментални резултати и изследвания на 3D полимерни материали, включително композитни

Настоящата глава обобщава резултатите от експериментални изследвания върху 3D отпечатани полимерни и композитни материали с различна геометрия – плоски плочки, цилиндри и сфери. Целта е да се оцени влиянието на формата, технологичните параметри и състава върху трибологичните и механичните свойства на материалите.

4.1. Резултати от изследваните коефициентите на триене на 3D отпечатани проби

В рамките на експерименталните изследвания бяха анализирани механичните и трибологичните свойства на 3D отпечатани полимерни и композитни материали. Бяха сравнени образци от различни материали, изготвени с параметри, гарантиращи висока повтораемост на геометрията и хомогенност на структурата. На фигури 4.1 и 4.2 са показани пробите от HIPS (High Impact Polystyrene) и TPU (Thermoplastic Polyurethane).



Фигура 4.1 *Проби за изследване на HIPS* **Фигура 4.2** *Проби за изследване на TPU*

Представени са резултати от изследване на трибологичните свойства на EasyFil HIPS (Dark Blue) при 3D принтиране, включително сравнителен анализ с други филаменти [91]. Проучено е взаимодействието на HIPS с PLA, PETG, CARBON, Steel Fil, TPU, Flex и Vero White чрез измерване на триене при плъзгане, триене при търкаляне и коефициент на възстановяване. На база експерименталните данни за TPU и HIPS са създадени симулационни модели за верификация и разработване на по-точни модели на взаимодействие между мелещите тела и смилателната среда.

4.1.1 Коефициент на триене при плъзгане

В настоящата глава са представени резултатите от експерименталните изследвания по методиката от Глава 3, с цел анализ на влиянието на различни параметри върху измерените стойности за полимери и композити, произведени чрез 3D печат.

Първо са обработени данните за кинетичното триене чрез формулите (3.1) – (3.7). Получените коефициенти на кинетично триене за различни наклони и повърхности са обобщени в таблица, показваща зависимостта между ъгъла на наклона и движението на блока. Фигура 4.3 илюстрира шестте измервания за определяне на ъгъла на плъзгане.



Фигура 4.3. Снимки от експеримента за намиране коефициент на триене при плъзгане

Таблица 4.1 съдържа измерените ъгли в градуси и радиани, както и изчисления коефициент на триене при плъзгане за материала EasyFil HIPS (Dark Blue) при контакт със себе си (HIPS+HIPS). В допълнение е направен сравнителен анализ с две други широко използвани 3D принтирани материали – PLA+PLA и PETG+PETG, с цел оценка на различията в трибологичното поведение при плъзгане.

Таблица 4.1. Коефициент на триене при плъзгане за HIPS+HIPS и сравнителен анализ с PLA+PLA и PETG+PETG

Материал (плочка 120/60/10 mm+плочка 60/60/10mm)	Ъгъл на триене, θ°	Ъгъл на триене, θ rad	Коефициент на триене при плъзгане, $\tan \theta^\circ$
Hips+Hips (1)	25,01	0,436507	0,46652
Hips+Hips (2)	22,06	0,38502	0,405245
Hips+Hips (3)	23,68	0,413294	0,438553
Hips+Hips (4)	19,98	0,348717	0,363575
Hips+Hips (5)	23,64	0,412596	0,437721
Hips+Hips (6)	24,23	0,422893	0,450047
Hips+Hips avg	23,1	0,403171	0,426536
PLA+PLA (1)	15,850	0,277	0,284
PLA+PLA (2)	19,610	0,342	0,356
PLA+PLA (3)	22,590	0,394	0,416
PLA+PLA avg	19,350	0,338	0,351
PETG+PETG (1)	21,300	0,372	0,390
PETG+PETG (2)	20,810	0,363	0,380
PETG+PETG (3)	24,430	0,426	0,454
PETG+PETG avg	22,180	0,387	0,408

В рамките на изследването беше оценено взаимодействието на EasyFil HIPS с различни широко използвани 3D принтирани материали – PLA, PETG, CARBON, Steel Fil, TPU, Flex и Vero White. На фиг.4.4. са показани снимки от проведения експеримент за намиране коефициент на триене при плъзгане. Използвани са 8 проби 60/60/10 от различни материали (Hips, PLA, PETG, Carbon Steel fill Vero white Flex TPU), плъзгани по плочка 120/60/10 Hips.



Фигура 4.4 Снимки от експеримента за намиране коефициент на триене при плъзгане

На таблица 4.2. са изложени резултатите от извършеното изследване по откриването на коефициента на плъзгане на материалите - Hips, PLA, PETG, Carbon Steel fill Vero white Flex TPU.

Таблица 4.2. Резултати от експеримента за намиране коефициент на триене при плъзгане **HIPS(120/60/10) + материал (60/60/10mm-HIPS. PLA, PETG, Carbon, Steel fill, Vero white, Flex, TPU)**

Материал (плочка HIPS 120/60/10 mm+плочка материал 60/60/10mm)	Ъгъл на триене , θ°	Ъгъл на триене , θ rad	Коефициент на триене при плъзгане, $\text{tg } \theta^\circ$
Hips 1	25,61	0,446979	0,479334
Hips 2	24,91	0,434762	0,464397
Hips 3	23,01	0,4016	0,424681
avg	24,51	0,42778	0,455937
PLA 1	26,04	0,454484	0,488597
PLA 2	28,2	0,492183	0,536195
PLA 3	31,41	0,548208	0,610642
avg	28,55	0,498292	0,544086
PETG 1	24,07	0,420101	0,446693
PETG 2	21,78	0,380133	0,399567
PETG 3	20,92	0,365123	0,382263
avg	22,25667	0,388452	0,409247
Carbon 1	25,38	0,442965	0,474407
Carbon 2	28,41	0,495848	0,540924
Carbon 3	26,48	0,462163	0,498146
avg	26,75667	0,466992	0,504187
Steel fill 1	21,98	0,383623	0,40362
Steel fill 2	27,79	0,485027	0,527017
Steel fill 3	31,28	0,545939	0,607532
avg	27,01667	0,47153	0,509892
Vero white 1	30,35	0,529707	0,585524
Vero white 2	31,01	0,541227	0,601098
Vero white 3	29,03	0,506669	0,554994
avg	30,13	0,525868	0,580379
Flex 1	46,49	0,811404	1,053412
Flex 2	47,27	0,825017	1,082552
Flex 3	50,38	0,879297	1,207934
avg	48,04667	0,838573	1,112433
TPU 20% 1	24,43	0,426384	0,454252
TPU 20% 2	25,63	0,447328	0,479764
TPU 20% 3	25,57	0,446281	0,478476
avg	25,21	0,439998	0,470777



Фигура 4.5.: Снимка от експеримента по определяне на коефициента на триене при плъзгане **TPU+HIPS**

Таблица 4,3.: Коефициент на триене при плъзгане TPU+материали(60/60/10mm-HIPS, PLA, PETG, Carbon, Steel fill, Vero white, Flex, TPU)

Материал (плочка TPU 120/60/10 mm+плочка материал 60/60/10mm)	Ъгъл на триене , θ°	Ъгъл на триене , θ rad	Коефициент на триене при плъзгане, $\text{tg } \theta^\circ$
Hips 1	25.61	0.446979	0.479334
Hips 2	24.91	0.434762	0.464397
Hips 3	23.01	0.4016	0.424681
avg	24.51	0.42778	0.455937
PLA 1	26.04	0.454484	0.488597
PLA 2	28.2	0.492183	0.536195
PLA 3	31.41	0.548208	0.610642
avg	28.55	0.498292	0.544086
PETG 1	24.07	0.420101	0.446693
PETG 2	21.78	0.380133	0.399567
PETG 3	20.92	0.365123	0.382263
avg	22.25667	0.388452	0.409247
Carbon 1	25.38	0.442965	0.474407
Carbon 2	28.41	0.495848	0.540924
Carbon 3	26.48	0.462163	0.498146
avg	26.75667	0.466992	0.504187
Steel fill 1	21.98	0.383623	0.40362
Steel fill 2	27.79	0.485027	0.527017
Steel fill 3	31.28	0.545939	0.607532
avg	27.01667	0.47153	0.509892
Vero white 1	30.35	0.529707	0.585524
Vero white 2	31.01	0.541227	0.601098
Vero white 3	29.03	0.506669	0.554994
avg	30.13	0.525868	0.580379
Flex 1	46.49	0.811404	1.053412
Flex 2	47.27	0.825017	1.082552
Flex 3	50.38	0.879297	1.207934
avg	48.04667	0.838573	1.112433
TPU 20% 1	24.43	0.426384	0.454252
TPU 20% 2	25.63	0.447328	0.479764
TPU 20% 3	25.57	0.446281	0.478476
avg	25.21	0.439998	0.470777

4.1.2. Коефициент на триене при търкаляне

Представени са резултатите от експерименталното определяне на коефициента на триене при търкаляне върху наклонена повърхност. Измерванията са извършени при различни ъгли на наклона θ , като за всяка серия опити е отчетена съответната сила на триене, изчислена по формула (3.8). На базата на получените данни е определен коефициентът на триене при търкаляне, а резултатите са обобщени в таблица 4.4 и представени на фиг. 4.6.



Фигура 4.6. Снимки от експеримента по намиране на коефициент на триене при търкаляне

На фиг. 4.6 са показани снимки от експеримента с всеки отделен материал - PLA, PETG, Carbon, Steel fill, Vero white и Steel. В таблица 4.4. са изложени резултатите от изследването, където са осъществени по 3 опита с всеки един материал и е представена средната стойност

на коефициент на триене при търкаляне. Установява се, че при взаимодействието на HIPS с PETG имаме най-висок коефициент на триене при търкаляне (0,31344), а най-малък със Steel (0,179604).

Таблица 4.4.: Резултати от коефициент на триене при търкаляне плочка *HIPS*+ сфера от посочените материали

Материал (Hips плочка + сфера от материали)	Ъгъл на триене, θ°	Ъгъл на триене, θ rad	Коефициент на триене при търкаляне, $\sin \theta^\circ$
Hips 1	6,33	0,110479	0,110255
Hips 2	7,94	0,138579	0,138136
Hips 3	17,21	0,300371	0,295875
avg	10,49333	0,183143	0,182121
PLA 1	11,95	0,208567	0,207058
PLA 2	15,51	0,270701	0,267407
PLA 3	18,04	0,314857	0,309681
avg	15,16667	0,264708	0,261628
PETG 1	16,53	0,288503	0,284517
PETG 2	18,29	0,319221	0,313827
PETG 3	19,98	0,348717	0,341692
avg	18,26667	0,318813	0,31344
Carbon 1	10,59	0,18483	0,18378
Carbon 2	15,19	0,265116	0,262021
Carbon 3	17,63	0,307702	0,302869
avg	14,47	0,252549	0,249873
Steel fill 1	13,74	0,239808	0,237516
Steel fill 2	21,64	0,377689	0,368774
Steel fill 3	10,45	0,182387	0,181377
avg	15,27667	0,266628	0,26348
Vero white 1	14,06	0,245393	0,242938
Vero white 2	6,99	0,121999	0,121696
Vero white 3	12,15	0,212058	0,210472
avg	11,06667	0,19315	0,191951
Steel 1	8,16	0,142419	0,141938
Steel 2	9,21	0,160745	0,160053
Steel 3	13,67	0,238587	0,236329
avg	10,34667	0,180583	0,179604

4.1.3. Коефициент на възстановяване

За намирането на коефициента на възстановяване се извършват по 3 експеримента с всеки отделен материал и е взета средната стойност. Получените резултати от експериментите са показани в таблица 4.5. За да се определи коефициентът на реституция се използва формулата [91]:

$$e = \frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Където:

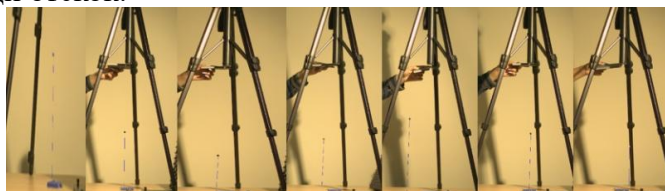
e - коефициент на възстановяване;

v_2 - скорост след отскок;

v_1 - скорост преди отскок;

h_1 -височина преди отскок;

h_2 -скорост преди отскок.



Фигура 4.7 Снимки от експеримента за намиране коефициент на реституция

Таблица 4.5.: Коефициент на възстановяване плочка HIPS+ сфери от посочените материали:

Материал (Основа/Сфера)	№	Начална височина [mm]	Височина на отскока [mm]	D/C	е-Коефициент възстановяване SQRT D/C
Hips/Hips	1	650	320,41	0,492938	0,702096
	2	650	94,47	0,145338	0,381233
	3	650	67,65	0,104077	0,32261
	avg	650	160,8433	0,247451	0,497445
Hips/Carbon	1	650	281,9	0,433692	0,658553
	2	650	250,34	0,385138	0,620595
	3	650	238,13	0,366354	0,605272
	avg	650	256,79	0,395062	0,628539
Hips/PETG	1	650	180,97	0,278415	0,527651
	2	650	234,41	0,360631	0,600525
	3	650	369,51	0,568477	0,753974
	avg	650	261,63	0,402508	0,634435
Hips/PLA	1	650	255,67	0,393338	0,627167
	2	650	293,08	0,450892	0,671485
	3	650	315,73	0,485738	0,696949
	avg	650	288,16	0,443323	0,665825
Hips/Steel	1	650	354,57	0,545492	0,738575
	2	650	313,39	0,482138	0,694362
	3	650	339,75	0,522692	0,722975
	avg	650	335,9033	0,516774	0,71887
Hips/Steel fill	1	650	277,17	0,426415	0,653005
	2	650	313,43	0,4822	0,694406
	3	650	248,4	0,382154	0,618186
	avg	650	279,6667	0,430256	0,655939
Hips/Vero White	1	650	208,98	0,321508	0,567016
	2	650	268,56	0,413169	0,642782
	3	650	171,42	0,263723	0,51354
	avg	650	216,32	0,3328	0,576888

4.1.4. Изследване и приложение на трибологични характеристики на 3D принтирани материали за тактилните възприятия на хора в неравностойно положение

3D технологиите създават нови възможности за подобряване на достъпа на хора с нарушено зрение до информация и културно наследство чрез изработка на тактилни обекти, брайлови надписи и образователни модели [92].

Изследвани са трибологичните фактори – грапавост, устойчивост и височина на слоя – при 3D принтирани материали PLA и Visijet PXL Core. Резултатите показват, че висока резолюция (0.06 mm) и контури около 1 mm осигуряват най-добро тактилно възприятие.

Разработените модели са внедрени в Софийския университет „Св. Климент Охридски“ [93].
Резултати:

- Повърхностната гладкост и ниската грапавост са определящи за позитивното тактилно възприятие. Обекти, принтирани с PLA на висока резолюция (0.06 mm), се оценяват като най-гладки и лесни за разпознаване.
- Контурните релефи с ширина около 1 mm осигуряват най-добра тактилна устойчивост и възприемане на формата. По-тънките (0.5 mm) са твърде фини, а по-дебелите (1.2 mm) се възприемат като груби и пречат на разпознаването на детайлите.
- При брайловите надписи най-добро възприятие показват размери, съответстващи на определени размери от стандартни шрифтове. По-големи размери са подходящи за хора, които рядко четат Брайл.
- Някои обекти от културно-историческото наследство (Сфинкс, Изиди) са трудни за разпознаване от слепи участници, докато по-опростени форми (животни, къща, автомобил) се идентифицират по-успешно.
- Трибологичните свойства на повърхностите (сила на триене при допир, равномерност, грапавост) оказват пряко влияние върху лекотата и скоростта на разпознаване.

Изследвана е тактилната пригодност на 3D отпечатани материали за хора с нарушено зрение. Материалите са изработени чрез технологии FDM (PLA) и ColorJet (гипсов материал с различни покрития).

Създадени са различни 3D модели – египетски символи, животни, автомобили, брайлова азбука, учебни и игрови обекти (фиг. 4.8).

В експеримента участват 5 слепи и 4 човека с намалено зрение, които оценяват моделите чрез допир. Резултатите подпомагат определянето на подходящи материали и технологии за създаване на тактилни образователни и културни модели.

Детайлите от фиг. 1а) до фиг. 1е) са отпечатани чрез технология FDM, а този от фиг. 4.8 ж) — чрез технология CJP.

Материалът PLA е 3D принтиран чрез FDM технология при следните параметри: 20% запълване, 3 външни стени, температура на леглото 60 °C, на дюзата 215 °C, скорост 60 mm/s и височина на слоя 0,06 mm или 0,2 mm.

Детайли като богинята Изиди, Брайловата азбука, глобусът и др. са отпечатани с висока резолюция (0,06 mm), докато Сфинксът, бухалът и животинските модели – с 0,2 mm.

Обектът на фиг. 4.8 ж) е изработен в 6 варианта, обработени с различен брой покрития Color Bond™ 30 (от 2 до 6 слоя), като едно е оставено без наakisване.

В експеримента участват две групи млади хора с нарушено зрение – едната с прогресивна загуба на зрение, другата – родени незрящи. При тестовите част от моделите са описани, други не, а на трети са дадени грешни инструкции за проверка на способността за разпознаване.



а)

б)



в)



г)



д)



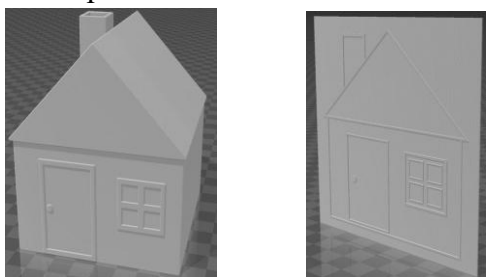
е) ж)

Фигура 4.8. 3D принтирани образци

Изследвания, насочени към разбирането как да се „чете“ картина, са извършени чрез опипване на реален 3D модел (фиг. 4.9 а), след което моделът е превърнат в тактилно изображение (фиг. 4.9 б).

Изследвани са трибологични фактори като грапавостта на материала и височината на слоя на 3D принтираните обекти, тъй като специализираната литература е богата на изследвания за влиянието на тези фактори, особено по отношение на произведения на изкуството.

При тактилната плочка са наблюдавани следните фактори на обекта: височина на контура, ширина на контура и възприятие.



а) 3D модел на къща б) 2D тактилна версия

Фигура 4.9 3D модел на къща

Целта на изследването е да се определи кои детайли, шрифтове и дебелини на линиите са най-подходящи за тактилно възприятие. Фигурите на богинята Изиди (фиг. 4.8 а) и Сфинкса (фиг. 4.8 б) са разпознати от хора със зрение, но не и от напълно незрящи. Фигурата на бухал (фиг. 4.8 г) е идентифицирана успешно от зрително увредените и от незрящите с помощта на словесна подсказка; по-големият модел е оценен като по-удобен за тактилна ориентация.

Наблюдавани са минимални различия в повърхността между детайлите с различна резолюция (0,06–0,2 mm), като всички модели са разпознати, а най-фината фигура е най-гладка. Дефекти в долната част са свързани с поддържащия материал при печат. Египетските фигури не са разпознати от незрящите, докато Брайловите букви (фиг. 4.8 в) са ясни и лесни за четене. Най-подходящият размер за опитни читатели е 18 pt, а за начинаещи — 20–22 pt.



Фигура 4.10 3D принтиран Брайлов текст

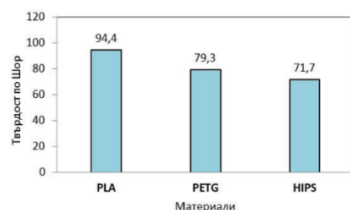
4.2. Резултати от изследването на микротвърдостта на материалите

За измерването на микротвърдостта по шор бяха отпечатани плоски образци, след което бяха притиснати с твърдомер (Instruction Manual Digital Shore Hardness Tester SAUTER HD) на стенда. В таблица 4.6 са представени резултати за плътността и твърдостта по Шор на изпитваните материали като средно-аритметична стойност от три измервания.

Таблица 4.6 Резултати за плътността и твърдостта по Шор А на изпитваните 3D материали

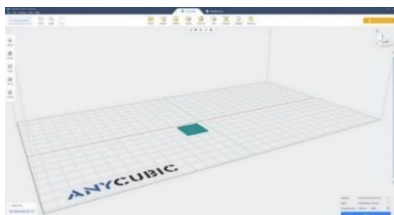
Материал	Плътност, g/cm ³	Твърдост по Шор А
PLA	1.1459	94.4
PETG	1.1459	79.3
HIPS	0.9563	71.7

На фиг. 4.11 е представена диаграма на твърдостта по Шор съгласно данните от таблица 4.6. Най-висока твърдост има материал PLA, а най-малка – материал HIPS, който има и най-ниска плътност.

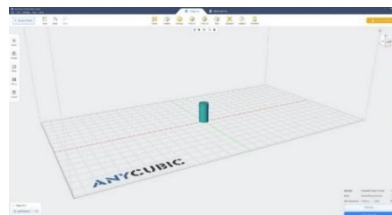


Фиг. 4.11 Диаграма на твърдостта на изпитваните материали

За изследване на микротвърдостта с твърдомер EBP BRV-187.5T бяха моделирани два вида изпитвателни образци – плочки (фиг. 4.12) и цилиндри (фиг. 4.13), проектирани в Anycubic Photon Workshop. Софтуерът позволява оптимизация на 3D моделите за фотополимерно принтиране и контрол върху геометрията и ориентацията при отпечатване. Плочките, с малка дебелина и равномерна повърхност, се използват за оценка на повърхностното втвърдяване, докато цилиндрите, с по-голям обем, позволяват анализ на ефекта от UV обработката при масивни структури. Всички образци са принтирани и обработени при идентични параметри, осигуряващи сравнимост и надеждност на резултатите.



Фигура 4.12 Моделирана плочка с размери 20x20 мм и дебелина 1 мм



Фигура 4.13 Моделиран цилиндър с височина 20 мм и диаметър 10 мм

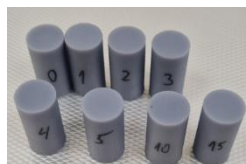
Изборът на тези два типа геометрии е направен по две основни причини:

- 1) Различните форми и размери позволяват да се изследва влиянието на UV обработката върху повърхностната твърдост при обекти с различна дебелина и обем, като така се оценява ефектът на геометрията върху степента на втвърдяване.
- 2) Формите са подбрани и с оглед на практическото им приложение – плочките (фиг. 4.14 а) наподобяват тактилни навигационни плочки, а цилиндрите (фиг. 4.14 б) могат да се използват при създаване на тактилни елементи за хора с нарушено зрение [94].

Целта на експериментите е постигане на по-висока повърхностна твърдост за увеличаване на износоустойчивостта и дълготрайността на тези елементи при реална употреба.



А)



Б)

Фигура 4.14 Тествани проби от Resin 3D материал, А) плочи, Б) цилиндри.

Описаният в глава 2 **твърдомер EBP BRV-187.5T** беше използван за получаване на резултатите. За целите на изследването и проведените експерименти беше избрана Rockwell скала HRR 60 с индентор с диаметър 12,7 mm (фиг.4.15).



Фигура 4.15 Индентор с диаметър 12,7 mm

На фиг. 4.16 е показан екранът на контролния панел на твърдомера EBP BRV-187.5T по време на настройка на параметрите за изпитване. На дисплея се въвеждат основни данни – номер на пробата, радиус на кривина, диапазон на измерване, избрана скала за твърдост, тип конверсия и време на задържане. След конфигуриране на параметрите изпитването се стартира с бутона Start. Интуитивният интерфейс осигурява прецизен контрол върху условията на измерване и гарантира висока точност и повторяемост на резултатите.



Фигура 4.16 Контролен панел на твърдомер EBP BRV-187.5T

На фиг. 4.17 е показан твърдомерът EBP BRV-187.5T, използван за определяне на повърхностната твърдост на образците. Уредът е оборудван с индентор и цифров дисплей с интуитивен интерфейс, който позволява избор на подходяща Rockwell скала (HRA, HRB, HRC и др.) според материала и геометрията на пробите.

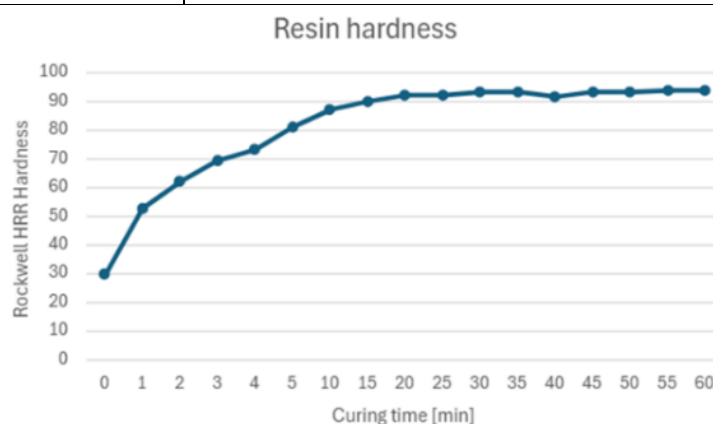


Фигура 4.17 Твърдомер EBP BRV-187.5T с монтирания индентор използван в изследването

В таблица 4.7 и фиг. 4.18 са представени резултатите от изпитване на повърхностната твърдост на фотополимерни плочки $20 \times 20 \times 1$ mm (фиг. 4.14 а), отпечатани с принтер Anycubic и облъчени с UV светлина. Установено е, че твърдостта нараства с времето на UV обработка, като оптимален резултат се постига след 15 минути. По-дългото облъчване не води до значими промени, което определя 15-минутната обработка като най-ефективна по отношение на време, енергия и качество на повърхността.

Таблица 4.7 Изпитване за твърдост на плочка от смола с размери 30x30 mm и дебелина 1 mm

<i>Resin UV Time [min]</i>	<i>Rockwell HRR 60 (12.7 mm) ball</i>
0	30.2
1	53.1
2	62.3
3	69.6
4	73.4
5	81.3
10	87.6
15	90.5
20	92.6
25	92.7
30	93.8
35	93.3
40	92.1
45	93.5
50	93.4
55	94.3
60	94.4



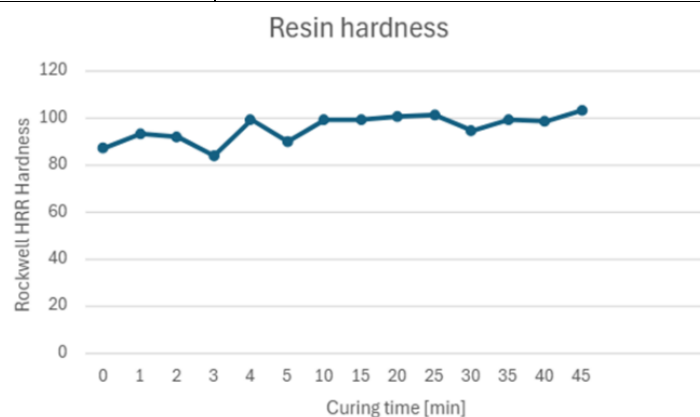
Фигура 4.18 Изпитване за твърдост на плочка от смола с размери 20x20 mm и дебелина 1 mm от таблица 1, представено в графичен вид

При цилиндрични образци с височина 20 mm и диаметър 10 mm (фиг. 4.14 б) се наблюдават значителни различия спрямо плоските проби. Данните (табл. 4.8, фиг. 4.19) показват, че удължаването на UV облъчването не увеличава съществено повърхностната твърдост, която остава стабилна.

Причината е ограниченото проникване на UV светлината в масивните структури – вътрешните слоеве остават частично полимеризирани, а общата твърдост не се повишава значително. Резултатите подчертават необходимостта параметрите на UV обработката да се съобразяват с геометрията и дебелината на детайлите, тъй като ефектът е силен при тънки, но ограничен при обемни обекти, което може да доведе до неравномерни механични свойства.

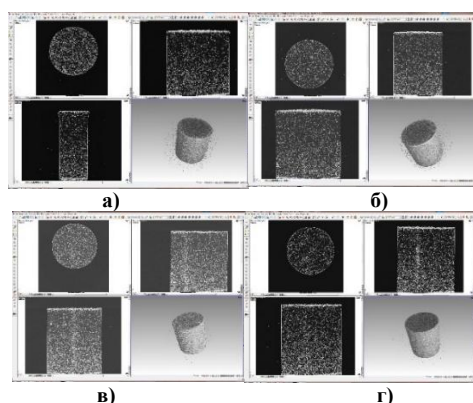
Таблица 4.8 Изпитване за твърдост на цилиндър с височина 20 мм и диаметър 10 мм, изработен от смола

<i>Resin UV Time [min]</i>	<i>Rockwell HRR 60 (12.7 mm) ball</i>
0	87.7
1	93.3
2	92.4
3	84.3
4	99.4
5	90.2
10	99.7
15	99.3
20	100.8
25	101.8
30	95.1
35	99.7
40	98.9
45	103.6



Фигура 4.19 Изпитване за твърдост на цилиндър с височина 20 мм и диаметър 10 мм, изработен от смола, представено в графична форма

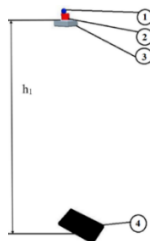
UV обработката повишава само повърхностната твърдост на смолните образци, без да засяга вътрешната структура. Анализът с 3D компютърен томограф Nikon XT-H 225 показва еднородност и постоянна дебелина на слоевете (фиг. 4.20).



Фигура 4.20 Сечения на четири цилиндъра с триизмерна реконструкция чрез компютърна томография: а) No0 от фиг.4.19 б), б) No 5 от фиг. 4.19 б), в) No10 от фиг.2б), г) No 15 от фиг. 4.19 б)

4.3. Симулационни изследвания на 3D отпечатани проби с EDEM софтуер

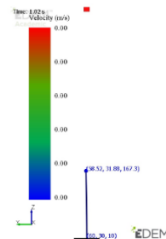
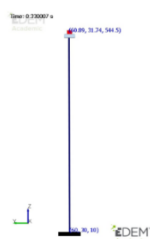
Опитната установка за провеждане на експериментите е показана на фиг. 4.21. 3D принтираната сфера (1) се поставя в улей (2), след което застава на плоча (3). При премахване на плочата (3), сферата (1) пада свободно от височина $h_1 = 540 \text{ mm}$ върху 3D принтираната плоча 4.



Фигура 4.21 Схема на опитната установка.

Целта на симулационното моделиране е да се верифицира максималната височина на отскока на сферата спрямо резултатите от опитното определяне на коефициента на реституция. Софтуерът следи движението на сферата в координати XYZ от начална точка (център на сферата на разстояние 544,5 mm от плочата, фиг. 4.22) до крайната точка, зададена върху горната повърхност на плочата ($X = 60 \text{ mm}$, $Y = 30 \text{ mm}$, $Z = 10 \text{ mm}$).

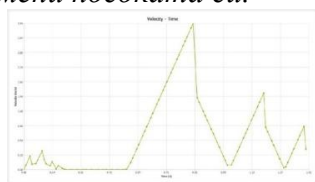
Максималната височина на отскока е 167,3 mm, при което сферата е в покой (фиг. 4.23–4.24). Максималната скорост по време на движението е 3,19 m/s (фиг. 4.25), а динамиката на отскоците и затихването е показана на фиг. 4.26.



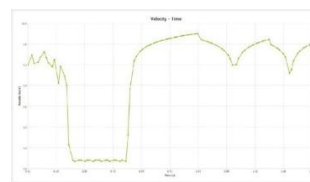
Фигура 4.22 Първоначален момент от симулацията. да смени посоката си.

Фигура 4.23 Разстояние на отскок.

Фигура 4.24 Скорост в момента, преди сферата



Фигура 4.25 Скорост при свободно падане на сфера.



Фигура 4.26 Динамика на отскока при свободна падане на сфера.

Резултатите от симулационното моделиране са близки до експерименталните: средна височина на отскок от експерименталното изследване е $h_2 = 163,7 \text{ mm}$ и експериментално $h_2 = 162,8 \text{ mm}$ при симулацията (след корекция с радиуса на сферата 4,5 mm). Коефициентът на реституция експериментално е $e = 0.5495$, а от симулационното моделиране е $e = 0.5490$, което потвърждава валидността на модела.

Изследване на Easy Fil HIPS и TPU материали за 3D печат

Данните, получени от реалното изпитване са изложени в таблица 4.9 и таблица 4.10, а от симулационното моделиране със софтуер EDEM, са представени в таблици 4.11 и 4.12.

Таблица 4.9 Коефициент на възстановяване на EasyFil HIPS с други материали

Плоча/Сфера	Височина на отскок [mm]	D/C	е- коефициент на реституция SQRT D/C
Easy Fil HIPS (dark)/ Easy Fil HIPS (dark)/	293,36	0,451323	0,279382
Easy Fil HIPS (dark) / TPU	264,8767	0,407503	0,245082
Easy Fil HIPS (dark) / Easy Fil HIPS (blue)	353,2133	0,543405	0,30431
Easy Fil HIPS (dark) / PLA	344,1533	0,529467	0,287751
Easy Fil HIPS (dark) / PETG	338,2267	0,520349	0,255446
Easy Fil HIPS (dark) / Carbon	307,7933	0,473528	0,272056
Easy Fil HIPS (dark) / Steel fill	254,2767	0,391195	0,180176
Easy Fil HIPS (dark) / Vero White	296,92	0,4568	0,225801

Таблица 4.10 Коефициент на възстановяване на TPU материал с други материали

Плоча/Сфера	Височина на отскок [mm]	D/C	е- коефициент на реституция SQRT D/C
TPU / Easy Fil HIPS (dark)	206,7067	0,31801	0,563924
TPU /TPU	197,0167	0,303103	0,550548
TPU / Easy Fil HIPS (blue)	168,72	0,259569	0,509479
TPU /PLA	238,1467	0,366379	0,605293
TPU/PETG	197,1767	0,303349	0,550771
TPU /Carbon	254,1467	0,390995	0,625296
TPU /Steel fill	253,7167	0,390333	0,624767
TPU /Vero White	241,9667	0,372256	0,610128

Таблица 4.11 Симулационно моделиране на коефициента на възстановяване с 3d печатен материал - Easyfil HIPS

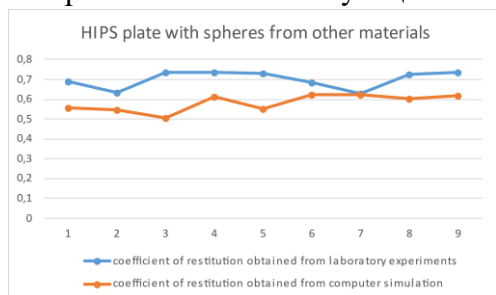
Плоча/Сфера	Височина на отскок [mm]	D/C	е- коефициент на реституция SQRT D/C
Easy Fil HIPS / Easy Fil HIPS (dark)	308,1	0,474	0,688477
Easy Fil HIPS /TPU	262,4	0,403692	0,635368
Easy Fil HIPS / Easy Fil HIPS (blue)	351,1	0,540154	0,734952
Easy Fil HIPS /PLA	352,6	0,542462	0,73652
Easy Fil HIPS /PETG	349,4	0,537538	0,73317
Easy Fil HIPS /Carbon	306,7	0,471846	0,686911
Easy Fil HIPS /Steel fill	256,1	0,394	0,627694
Easy Fil HIPS /Vero White	340	0,523077	0,723241

Таблица 4.12 Симулационно моделиране на коефициента на възстановяване с основа TPU 3D печатен материал

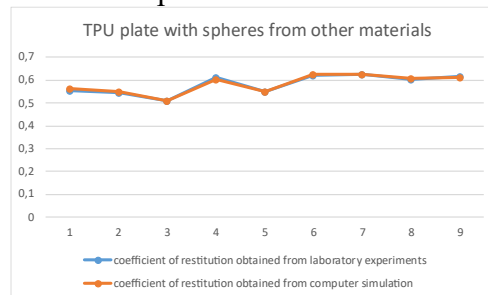
Плоча/Сфера	Височина на отскок [mm]	D/C	е- коефициент на реституция SQRT D/C
TPU / Easy Fil HIPS (dark)	200,2	0,308	0,554977
TPU /TPU	193,9	0,298308	0,546176
TPU / Easy Fil HIPS (blue)	167,5	0,257692	0,507634
TPU /PLA	245,2	0,377231	0,614191
TPU/PETG	196,3	0,302	0,549545
TPU /Carbon	252,8	0,388923	0,623637
TPU /Steel fill	254,7	0,391846	0,625976
TPU /Vero White	238,4	0,366769	0,605615

Построени са две графики за всеки от двата типа материал, за да се представят резултатите по по-ясен и сравнителен начин и да се улесни сравнението с резултатите от лабораторните експерименти. Фигура 4.27 показва сравнителна графика за експерименталните и

симулационните данни на EasyFil HIPS материала, а Фигура 4.28 показва сравнителна графика за експерименталните и симулационните данни на TPU материала.



Фиг. 4.27 Експериментални резултати от HIPS в сравнение със симулирани резултати



Фиг. 4.28 Експериментални резултати от TPU в сравнение със симулирани резултати

4.4. Заключение

Експерименталните изследвания върху 3D отпечатани полимерни и композитни материали показаха, че геометрията на пробите, технологичните параметри и съставът на материала оказват съществено влияние върху трибологичните и механичните свойства, включително коефициентите на триене при плъзгане и търкаляне и коефициента на възстановяване. Микротвърдостта потвърди зависимостта между структурната хомогенност и устойчивостта при локално натоварване, а металографските наблюдения разкриха морфологични особености и дефекти, важни за оптимизацията на 3D печата.

Съпоставката между експерименталните данни и симулационното моделиране показва добро съответствие (отклонения 0,19–7,01%), което потвърждава валидността на методиката и позволява калибриране на моделите за анализ на системи с контактно взаимодействие. Особено внимание бе отделено на измерванията по Rockwell за меки образци, като правилният избор на скала и стриктното следване на стандарти осигуряват надеждни резултати.

UV-третирането на смолисти проби след 3D печат увеличава повърхностната твърдост, без да променя вътрешната структура, като оптимално време за фотополимеризация за тактилни приложения е 2–4 минути. За плоски образци минимална дебелина от 2–3 mm е необходима за механична устойчивост и предотвратяване на разрушаване при експлоатация.

Глава 5

Насоки за бъдещи изследвания

Въз основа на проведените експерименти и получените резултати могат да се очертаят следните посоки за развитие на изследванията върху трибологичните и механичните свойства на 3D отпечатани полимерни и композитни материали.

5.1. Усъвършенстване на методиките за 3D принтиране

Необходими са експерименти за оптимизация на параметрите на печат (температура, дебелина на слой, ориентация) и сравнение на различни технологии (FFF, SLA, SLS, PolyJet). Перспективно е използването на рециклирани и биоразградими материали за устойчиво производство и нови композити с подобрени свойства.

5.2. Разширяване на изследванията на механичните и трибологичните свойства

Изследванията трябва да включват различни температури, влажност, динамични натоварвания и повърхностни обработки (UV, плазма, нанопокрития). Микро- и наноизмервания (наноиндентирание, micro-CT) ще подобрят разбирането за влиянието на структурата върху поведението на материала.

5.3. Усъвършенстване на симулационните модели

Разработване и калибриране на DEM/FEM модели спрямо експериментални данни за триене и възстановяване. Комбинираните симулации позволяват създаване на цифрови близнаци за трибологични системи.

5.4. Приложение в инженерната и социалната практика за подобряване на живота и на зрително увредени хора

Резултатите подпомагат проектирането на функционални и износоустойчиви детайли за индустрия, медицина и помощни средства за хора със зрителни увреждания. Перспективно е създаването на композити с самосмазващи се или самовъзстановяващи свойства.

5.5. Развитие на научно-приложната база

Въвеждането на автоматизирани измервателни системи и онлайн мониторинг ще увеличи точността на експериментите. Разширената база данни ще позволи създаване на модели и алгоритми за прогнозиране на свойства още при проектирането.

5.6. Заключение

Представените бъдещи стъпки очертават стратегическа посока за развитие на изследванията, която комбинира експериментални, числени и приложни подходи. Продължаването на тази работа ще допринесе за създаването на високотехнологични решения в областта на адитивното производство, за оптимизацията на трибологичните системи и за внедряването на интелигентни материали в реални инженерни приложения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящият дисертационен труд представя системно изследване на трибологичните и механичните свойства на полимерни и композитни материали, получени чрез технологии за 3D принтиране. Основната цел на изследването беше да се разработят, приложат и анализират методики за експериментална и симулационна оценка на поведението на тези материали при различни условия на натоварване, като се търси връзката между технологичните параметри на адитивното производство, геометрията на образците и функционалните им характеристики.

В първа глава е представен литературен обзор и аналитичен преглед на съвременните постижения в областта на трибологията и адитивните технологии. Извършена е класификация на трибологията, разгледани са основните принципи, физико-механични зависимости и фактори, влияещи върху триенето, износването и възстановяването.

В глава втора са описани технологията на трибологичните изследвания, използваните устройства, измервателни системи и експериментално оборудване. Подробно са представени конструкцията, характеристиките и принципите на работа на апаратурите, както и организацията на експерименталния процес, което създава основата за възпроизводимост и достоверност на резултатите. Анализирани са основните технологии за 3D печат и техните приложения при изследване и разработване на функционални материали.

Третата глава е посветена на разработването на методики за провеждане на изследванията. В нея са формулирани и обосновани методологичните подходи за 3D принтиране на пробите, за анализ на микротвърдостта, за изследване на трибологичните параметри (коефициенти на триене при плъзгане, търкаляне и коефициент на възстановяване), както и за симулационно моделиране в среда на EDEM Software. Тези методики представляват интегрирана експериментално-аналитична система, осигуряваща възможност за съпоставка между реални и симулирани резултати.

В четвърта глава са представени експерименталните резултати и анализите, проведени върху 3D отпечатани образци от различни материали и геометрии. Получените данни показват ясни зависимости между производствените параметри, геометрията и механичното поведение на материалите. Установено е, че чрез оптимизиране на технологичните условия може целенасочено да се подобрят трибологичните характеристики на полимерите и композитите. Експерименталните резултати са съпоставени със симулационни модели, като отчетените разлики са в границите от 0,19% до 7,01%, което потвърждава надеждността и валидността на предложените модели.

Пета глава очертава бъдещите направления за развитие на изследванията. Акцент е поставен върху усъвършенстването на методиките за 3D печат, оптимизацията на параметрите на екструдирани и изследването на нови материали, включително биоразградими и рециклирани полимери. Разширяването на изследователската база и интегрирането на нови технологии за анализ ще допринесат за създаване на по-устойчиви и функционални материали, подходящи за широк спектър инженерни приложения.

Обобщено, проведените изследвания допринасят за задълбочаване на познанията в областта на трибологията на 3D отпечатаните материали и предоставят практическа основа за усъвършенстване на симулационните модели и експерименталните методики.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Настоящият дисертационен труд допринася съществено както за научната област на трибологията на полимерни и композитни материали, така и за практическото приложение на адитивните технологии. Основните научно-приложни приноси могат да бъдат обобщени както следва:

1. **Класификация на трибологични процеси** – разгледани са основните принципи, приложения, общи теории, класически методи, сили и коефициенти събрани в науката трибология. На тяхна база е създадена класификация на трибологични процеси, отчитаща основните принципи, приложения, общи теории, механични химични и физични свойства.
2. **Разработване на методики за изследване на трибологичните свойства на 3D отпечатани материали** – създадени са и валидирани експериментални процедури за определяне на коефициентите на триене при плъзгане и при търкаляне, както и на коефициента на възстановяване на еластичността. Тези методики осигуряват възпроизводимост и точност на измерванията и могат да бъдат приложени при бъдещи изследвания на нови полимери и композити.
3. **Разработка на методики за анализ на механични свойства и микротвърдост** – чрез прилагане на твърдомери (EBP BRV-187.5T) и металографски наблюдения с Olympus BX53M и цифрова камера DP23 е установен прецизен подход за количествено определяне на твърдостта и еднородността на материалите. Това предоставя научно обоснована база за оценка на устойчивостта и качеството на 3D отпечатаните образци.
4. **Съпоставка между експериментални данни и симулации** – разработените модели в среда на EDEM Software позволяват числено възпроизвеждане на трибологичните процеси и валидиране на експерименталните резултати. Получените съвпадения с отклонения до 7% показват приложимостта на симулационните модели за прогнозиране на поведението на материали при контактено натоварване.
5. **Научни изводи за влиянието на технологичните параметри на 3D печата** – изследванията демонстрират значението на геометрията на образците, дебелината на слоя, ориентацията при печат и материалния състав върху трибологичните и механичните характеристики. Това предоставя възможност за оптимизация на производствените процеси в индустриалната практика.
6. **Възможности за екологично устойчиво производство** – разработени са подходи за използване на рециклирани и биоразградими полимери, което полага основата за устойчиво и екологично ориентирано производство на функционални компоненти чрез адитивни технологии.
7. **Приложни аспекти в инженерната и социалната практика** – получените резултати могат да бъдат приложени при проектирането на износоустойчиви елементи в машиностроенето, медицината и потребителските изделия, както и при разработката на тактилни продукти за хора с нарушено зрение, като се осигурява оптимален баланс между твърдост, износоустойчивост и безопасност.

Обобщено, научно-приложният принос на дисертационния труд се състои в създаването на **интегрирана експериментално-симулационна система** за оценка и оптимизация на свойствата на 3D отпечатани полимерни и композитни материали, която намира приложение както в научните изследвания, така и в инженерната практика.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Манолов, Н.Т. и Кандева, М.К., *Обща трибология.*, София Технически университет – София.
- [2] Kandeva, M., Vencel, A. and Karastoyanov, D., 2016. *Advanced Tribological Coatings for Heavy-Duty Applications: Case Studies.* Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House.
- [3] Kandeva-Ivanova, M., Karastoyanov, D., Ivanova, B. and Assenova, E., 2016. *Tribological Interactions of Spheroidal Graphite Cast Iron Microalloyed with Tin.* Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House.
- [4] H. P. Jost, “Tribology — Origin and future,” *Wear*, vol. 136, no. 1, pp. 1-17, 1990, doi: 10.1016/0043-1648(90)90068-L
- [5] Bultrib, 1963. *Tribology in Bulgaria. Beginning and Advance.* [online] Available at: <https://bultrib.com/?l=1&p=2> [Accessed 5 March 2025]
- [6] Bultrib, 2014. *40 Years Tribology in Bulgaria.* [pdf] Available at: https://bultrib.com/_data/40_years.pdf [Accessed 5 March 2025]
- [7] Assenova, Emilia & Kandeva, M.. (2008). State and outlooks of bulgarian tribology. *Journal of the Balkan Tribological Association*. 14. 274-283.
- [8] Манолов, Н., Кандева, М. и Асенова, Е., 2007. *Концепция за развитието на трибологията в България.* София: Св. Ив. Рилски.
- [9] *Държавен вестник*, 1990. Брой 34. София: Народно събрание.
- [10] ИНГА, 2008. *Списание „Контакти“.* София: Интердисциплинарна гражданска академия.
- [11] University of Leeds. (n.d.). *Tribology – Functional Surfaces Research.* Available at: https://eps.leeds.ac.uk/mechanical-engineering-research-functional-surfaces/doc/tribology?utm_source=chatgpt.com [Accessed 5 March 2025].
- [12] Wikipedia. (n.d.). *Leibniz Institute of Surface Engineering.* Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Leibniz_Institute_of_Surface_Engineering?utm_source=chatgpt.com [Accessed 5 March 2025].
- [13] Tokyo University of Science. (n.d.). *Initiatives – Tribology Research Center.* Available at: https://www.tus.ac.jp/en/initiatives/vol09/?utm_source=chatgpt.com [Accessed 5 March 2025]
- [14] Tsinghua University. (n.d.). *Tribology Research at Tsinghua University.* Available at: https://me.tsinghua.edu.cn/en/info/1248/1840.htm?utm_source=chatgpt.com [Accessed 5 March 2025].
- [15] Stachowiak, G.W. & Batchelor, A.W. (2013). *Engineering Tribology.* 4th ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann.
- [16] Kato, K. (2011). Industrial tribology: Trends and challenges for energy-efficient manufacturing. *Tribology International*, 44(5), pp. 498–508.
- [17] Xu, M., Zhang, X., Li, J., & Wang, Y. (2018). Energy loss due to friction and wear in industrial machinery: Global assessment. *Energy*, 144, pp. 891–902.
- [18] Holmberg, K. & Erdemir, A. (2017). The impact of tribology on energy use and CO2 emissions. *Tribology International*, 115, pp. 1–12.
- [19] Jost, H.P. (1966). *Lubrication (Tribology) – A Report on the Present Position and Industry Needs.* London: Her Majesty's Stationery Office.
- [20] Oxford University Press (n.d.). *Oxford Dictionary of Science.* Available at: <https://www.oxfordreference.com>
- [21] Kotseva, G. & Stoimenov, N. (2025) ‘Overview of tribology as an interdisciplinary science’, in 19th International Conference on Tribology – SERBIATRIB ’25. Kragujevac: Faculty of Engineering, University of Kragujevac. ISBN 978-86-6335-128-8.
- [22] American Society for Testing and Materials (ASTM) (2001). *ASTM Standards on Wear and Materials Testing.* West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [23] Halling, J. (1979). *Principles of Tribology.* London: Macmillan.
- [24] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (1969). *Engineering Materials Wear Research Group Report.* Paris: OECD.
- [25] Rabinowicz, E. (1995). *Friction and Wear of Materials.* 2nd ed. New York: Wiley.
- [26] Тошев, Б. (1973). *Теоретична механика.* София: Техника.
- [27] DoITPoMS (n.d.). *Elastic deformation: Hooke’s law and stiffness.* University of Cambridge. [Available at: https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/mechanical_properties/elastic.php]
- [28] LibreTexts (2020). *Stress-Strain Curves.* LibreTexts Engineering. Available at: <https://eng.libretexts.org>

- [29] Dowling, N.E. (2012). *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*. 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson.
- [30] Barbera, D., Chen, X. & Liu, Y. (2016). Creep-fatigue interaction in materials at high temperature. *International Journal of Fatigue*, 92(1), pp. 562–573.
- [31] Garofalo, F. (1965). *Fundamentals of Creep and Creep-Rupture in Metals*. New York: Macmillan.
- [32] Gellman, A.J. and Spencer, N.D. (2002). Surface chemistry in tribology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 216(6), pp. 443–461.
- [33] Somorjai, G.A. and Li, Y. (2010). *Introduction to Surface Chemistry and Catalysis*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.
- [34] McFadden, C., Soto, C. & Spencer, N. D., 1997. Adsorption and surface chemistry in tribology. *Tribology International*, 30(12), pp. 881–888
- [35] Lenard, J. (2002). *Boundary lubrication and tribochemistry*.
- [36] Hardy, J. and Bircumshaw, H. (1925). The monolayer theory of boundary lubrication.
- [37] Merz, R., Brodyanski, R. & Kopnarski, M. (2015). Oxide Film Formation and Tribological Behavior of Stainless Steel Surfaces. *Tribology International*, 82, pp. 231–242.
- [38] Delgado-Brito, I., Hernández-Ramírez, E., Guevara-Morales, G., Figueroa-López, J. & Campos-Silva, J. (2020). Surface Modification of Metals for Tribological Applications: Diffusion and Hardening Processes. *Materials Science and Engineering: A*, 786, 139398.
- [39] Hernández-Ramírez, E., Guevara-Morales, G., Figueroa-López, J. & Campos-Silva, J. (2020). Post-Boriding Diffusion Annealing for Improved Tribological Properties of Steel Components. *Surface & Coatings Technology*, 385, 125400.
- [40] Krishnaraj, R. & Roy, S. (2013). Diffusion Treatments in Tribology: Mechanisms and Applications. *Tribology International*, 66, pp. 1–12.
- [41] Maboudian, R. & Carraro, C. (2004). Surface processes and adhesion in microelectromechanical systems (MEMS). *Surface Science Reports*, 56(1–4), pp. 1–27.
- [42] Pattanaik, S. & Ojha, S. (2021). Tribological Challenges in MEMS Devices and Surface Treatments. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 30(5), pp. 923–936.
- [43] Sammoura, F., Hancer, M. & Yang, Y. (2011). Surface Adhesion and Friction in MEMS: Experimental Investigations. *Tribology Letters*, 44(3), pp. 377–389.
- [44] Zhu, X., Chu, J., Chen, W., & Lai, M. (2000). Self-assembled monolayers for MEMS surface modification. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 10(2), pp. 123–129.
- [45] Abdelbary, A. & Chang, L., 2023. *Principles of Engineering Tribology: Fundamentals and Applications*. eBook. Academic Press. ISBN 9780323991162.
- [46] SpecialChem, 2025. Hardness of Plastics - When to Use RockWell & Shore Scales. [online] Available at: <https://www.specialchem.com/plastics/guide/hardness-introduction> [Accessed: 20 April 2025].
- [47] EBPU Electromechanical Equipment (Zhejiang) Co. Ltd. (n.d.) Digital Universal Hardness Tester BRV-187.5T Testing Machine With Close Loop Load Cell [online]. Available at: <https://www.hardnesstesting-machine.com/Digital-Universal-Hardness-Tester-BRV-187-5T-Testing-Machine-With-Close-Loop-Load-Cell-pd49740224.html> (Accessed: 2 May 2025).
- [48] NAC Memrecam <https://www.nacinc.com/> (last accessed Sep. 2025)
- [49] Stoimenov N., Kotseva G., Georgieva V., Classification of 3D print technologies, 34th International Scientific and Technical Conference Automation of Discrete Production Engineering 2025, ISBN 978-619-7667-74-5, DOI: 10.53656/adpe-2025, Publisher: Az-buki National Publishing House, pp. 40-53
- [50] Kotseva G., Stoimenov N., Klochkov L.. Tribological Studies of 3D Printed Filaments. An Overview. XXXII International Scientific and Technical Conference, ADP - 2023., Sozopol, Bulgaria, Publishing house of TU-Sofia Publisher Department “Automation of Discrete Production Engineering“, 2023, ISSN:2682-9584, 150-154
- [51] Acierno, D., 2023. Fused Deposition Modelling (FDM) of Thermoplastic Materials. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10744784/> [Accessed 5 May 2025].
- [52] Stratasys, 2025. Stereolithography (SLA) 3D Printing Technology. [online] Available at: https://www.stratasys.com/en/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/stereolithography-technology/?utm_source=chatgpt.com [Accessed 2 May 2025].
- [53] Formlabs, 2025. Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing. [online] Available at: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d->

- printing/?srsltid=AfmBOoo0UY6N5mVIa26XASmWg3tPARJpyhzQOtKiykFjisSlpayTB96T&utm_source=chatgpt.com [Accessed 2 May 2025].
- [54] Berman, B., 2012. 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), pp.155–162.
- [55] Melchels, F.P.W., Domingos, M.A.N., Klein, T.J., Malda, J., Bartolo, P.J. & Huttmacher, D.W., 2010. Additive manufacturing of tissues and organs. *Progress in Polymer Science*, 37(8), pp.1079–1104.
- [56] Jackson Sanders, Xingjian Wei, Zhijian Pei, Experimental Investigation of PolyJet 3D printing: Effects of Sample Location and Volume on Power Consumption, *Manufacturing Letters*, Volume 31, 2022, Pages 83-86, ISSN 2213-8463, <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2021.07.013>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213846321000584>
- [57] Sinterit, 2025. Selective Laser Sintering in Details. [online] Available at: https://sinterit.com/blog/sls-technology/selective-laser-sintering-in-details/?utm_source=chatgpt.com [Accessed 5 July 2025].
- [58] 3DS, 2025. SLS – Selective Laser Sintering. [online] Available at: https://www.3ds.com/make/service/3d-printing-service/sls-selective-laser-sintering?utm_source=chatgpt.com [Accessed 5 July 2025].
- [59] Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E. & Emmelmann, C., 2016. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, pp.371–392.
- [60] Gibson, I., Rosen, D.W. & Stucker, B., 2021. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 3rd ed. Springer, Cham.
- [61] Sachs, E., Cima, M., Williams, P., Brancazio, D. & Cornie, J., 1992. Three-dimensional printing: Rapid tooling and prototypes directly from a CAD model. *Journal of Engineering for Industry*, 114(4), pp.481–488.
- [62] Huang, S.H., Liu, P., Mokasdar, A. & Hou, L., 2013. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, pp.1191–1203.
- [63] Derby, B., 2010. Inkjet printing of functional and structural materials: fluid property requirements, feature stability, and resolution. *Annual Review of Materials Research*, 40, pp.395–414.
- [64] Klosterman, D. A. (1999) Accuracy Study on Laminated Object Manufacturing for the Metallic ... [pdf] University of Texas at Austin. Available at: <https://utw10945.utweb.utexas.edu/Manuscripts/1999/1999-082-Suping.pdf> (Accessed: 1 June 2025).
- [65] Stratasys (2015) “Objet260 Connex 1-2-3 3D Printers”, Support Center, 2015. Available at: <https://support.stratasys.com/en/Printers/PolyJet-Legacy/Objet260-Connex-1-2-3> (Accessed: 8 June 2025).
- [66] Sabor SRL. (2015). Objet260 Connex3 – Specification Sheet. [online] Available at: <https://www.sabor-srl.com/wp-content/uploads/2017/05/Objet260-Connex3-Spec-Sheet-English-Web-08-2015.pdf> [Accessed 15 July 2025].
- [67] Stratasys. (n.d.). Objet260 Connex 1/2/3 – Support Portal. [online] Available at: <https://support.stratasys.com/en/printers/polyjet-legacy/objet260-connex-1-2-3> [Accessed 15 July 2025].
- [68] Ellsworth Adhesives. (n.d.). Objet260 Connex3 3D Printer Product Page. [online] Available at: https://www.ellsworth.co.th/product/product_100003108157912.html [Accessed 15 July 2025].
- [69] Applicad Indonesia. (n.d.). Objet260 Connex3 – Stratasys Design Series. [online] Available at: <https://www.applicadindonesia.com/3d-printer/stratasys-design-series/objet260-connex3/> [Accessed 15 July 2025].
- [70] Proto3000. (n.d.). Objet260 Connex3 3D Printer. [online] Available at: <https://proto3000.com/product/objet260-connex3/> [Accessed 15 July 2025].
- [71] Anycubic (2024) Photon M3 Max – Specifications. Available at: <https://www.anycubic.com/products/photon-m3-max> [Accessed: 21 July 2025].
- [72] Chockalingam, K. & Jawahar, N. (2017) A review of stereolithography process and its applications in additive manufacturing, *Materials Today: Proceedings*, 4(2), pp. 1140–1150. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.01.133.
- [73] Hull, C. W. (1986) Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography, U.S. Patent 4,575,330.
- [74] Gibson, I., Rosen, D. W. & Stucker, B. (2020) *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 3rd edn., Springer, Cham.
- [75] TWI Global (n.d.) What is Stereolithography (SLA)? Available at: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-stereolithography> [Accessed: 21 July 2025]
- [76] Fouly, A., Assaifan, A.K., Alnaser, I.A., Hussein, O.A. & Abdo, H.S., 2022. Evaluating the Mechanical and Tribological Properties of 3D Printed Polylactic-Acid (PLA) Green-Composite for Artificial Implant: Hip Joint Case Study. *Polymers*, 14(23), p.5299.
- [77] Santo, J., Ali, H., Kumar, V. & Zhang, Y., 2024. Effect of composite processing technique on tribological behavior of 3D-printed PLA/graphene composites. *Wear*, [online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X24006479>.

- [78] Wang, C., Li, Z., Chen, H. & Liu, J., 2024. Mechanical and tribological performance of FDM printed polymer composites: Influence of process parameters. *Wear*, [online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X23009891>.
- [79] Formlabs (n.d.) Guide to 3D Printing Materials: Types, Applications, and Properties [online]. Available at: <https://formlabs.com/blog/3d-printing-materials/> (Accessed: June 2025).
- [80] Стоименов Н., Карастоянов Д., Изследване движението и взаимодействието на различни форми мелещи тела., XXIV МНТК Автоматизация на дискретното производство „АДП – 2015” 18-21 Юни, Созопол 2015г., стр.148-153, ISSN – 13 10 -3946.
- [81] Stoimenov N., Ruzic J., INVESTIGATION OF MILLING PROCESSES IN HIGH ENERGY MILL (ATTRITOR)., XXV International Scientific and Technical Conference, ADP -2016., June 23-26th 2016, Sozopol, Bulgaria., pp.85-90, ISSN – 13 10 -3946.
- [82] Stoimenov N., Investigation of iron ore material for milling in semi-autonomous ball mill with standard lifter shape., XXVI International Scientific and Technical Conference, ADP - 2017., June 22-25th 2017, Sozopol, Bulgaria., pp. 61-65, ISSN – 13 10 -3946.
- [83] Stoimenov N., Sabotinkov N., Popov B., Investigation of Materials Behavior in Autogenous Grinding Mill, 8th International Conference on Mechanical Technologies and Structural Materials (MTSM 2018), Split, Croatia, September 27-28, 2018, Croatian Society for Mechanical Technologies, Croatia, ISSN: 1847-7917, pp. 173-176
- [84] N. Stoimenov, J. Ruzic, Analysis of the particle motion during mechanical alloying using EDEM software, 19th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability, TECIS 2019, Volume 52, Issue 25, November 2019, IFAC-PapersOnLine, Publisher: IFAC Secretariat, ISSN:2405-8963, pp 462-466
- [85] Stoimenov N., Panev P., Karastoyanov D., Software for 3D Modeling, Simulation and Optimization, XXVII International Scientific and Technical Conference, ADP - 2018., June 21-24th 2018, Sozopol, Bulgaria., pp. 329-334, ISSN – 13 10 -3946.
- [86] Kotseva, G., Stoimenov, N., Gyoshev, S., Georgieva, V.. Tribological Processes in TPU and HIPS 3D Printing Materials. 18th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV 2024), Published by IEEE, 2025, 1136-1141
- [87] M. P. F. Dunne, A. A. A. Alshahrani, J. A. E. Wriggers, Prediction of wear in polymer materials: A review, *Wear*, 426-427, pp. 226-241, 2019.
- [88] N. Ayrlimis, M. Kariz, J.H. Kwon, M. Kitek Kuzman, Effect of printing layer thickness on water absorption and mechanical properties of 3D-printed wood/PLA composite materials, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 102 (5-8), pp. 2195-2200, 2019.
- [89] Kotseva G., Stoimenov N., Kandeва M.. Tribological processes in the material for 3D printing filament HIPS. 12th International Conference on Mechanical Technologies and Structural Materials (MTSM 2023), Croatian Society for Mechanical Technologies, Croatia, 2023, ISSN:1847-7917, 137-144
- [90] <https://www.tianxing.com.cn/uploadfile/202101/b3a46b115c.pdf> [Last accessed May, 2025]
- [91] Kotseva G., Georgieva V., Gyoshev S.. Investigation of Tribological Parameters of 3D Printed Samples. *International Scientific Journal Machines.Technologies.Materials*, 19, 8, Scientific and technical union of mechanical engineering, 2023, ISSN:ISSN (Print) - 2535-0153 ISSN (Online) - 2535-0161, 255-259
- [92] Stoimenov N., Arsova M., Tomova M., Kotseva G., Kandeва M.. Investigation of tactile suitability in contact with 3D printed PLA material with visually impaired people. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 4, 29, Scientific Bulgarian Communications, 2023, ISSN:1310-4772, 581-590. SJR (Scopus):0.21
- [93] Софийски университет "Св. Климент Охридски" (2024) „Залите и пространствата във ФНОИ са напълно обозначени с брайлови табели“, Новини и събития, 30 април 2024 г. [онлайн]. Достъпно на: https://www.unisofia.bg/index.php/novini/novini_i_s_bitiya/zalite_i_prostranstvata_v_v_fnoi_sa_nap_lno_oboznachen_i_s_brajlovi_tabeli (Достъп: юни 2025 г.).
- [94] Stoimenov, N., Gyoshev, S. & Kotseva, G., 2025. A Study of the Hardness of 3D-Printed Materials for Blind Applications. 3rd International Conference on Computers in Natural Sciences, Biomedicine and Engineering (COMCONF), accepted for publication