

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО ИНФОРМАЦИОННИ И
КОМУНИКАЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ
Секция „Разпределени информационни и
управляващи системи“

ДИСЕРТАЦИЯ

За получаване на образователна и научна степен „ДОКТОР“
на маг. инж. Габриела Викторова Коцева

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

Научна област: 5. Технически науки
Професионално направление: 5.2. „Електротехника, електроника и
автоматика
Научна специалност: “Автоматизирани системи за обработка на
информация и управление“

Научен ръководител: **Проф. д-р Николай Иванов Стоименов**

София, 2025 г.

Съдържание

Благодарности.....	4
Увод.....	5
Цел и задачи на дисертационния труд.....	7
Използвани съкращения.....	8
Използвани термини.....	9
Глава 1	
Литературен обзор и анализ. Основни принципи и приложения на трибологията. Технологии, устройства и методи за изследване на полимери с 3D печат.....	14
1.1.Инженерна трибология. Трибологията като наука.....	14
1.1.1.Историческо развитие на трибологията.....	14
1.1.2. Кратък преглед на трибологията в България	16
1.1.3. Развитието на трибологията в света.....	17
1.1.4. Индустриалното и финансово значение на трибологията.....	18
1.2. Основни принципи и приложения на трибологията.....	19
1.2.1. Въведение в трибологията	20
1.2.2. Параметри, характеризиращи взаимодействието между повърхностите	24
1.2.3. Съществуващи стандартни методи за изпитване на триене, износване, адхезия и възстановяване	28
1.3. Механични свойства.....	29
1.3.1. Твърдост	30
1.3.2. Деформация.....	32
1.3.3. Умора.....	35
1.4. Химия на трибо-повърхностите.....	36
1.4.1. Адсорбция	36
1.4.2. Гранично смазване	36
1.4.3. Повърхностен филм	38
1.4.4. Дифузия.....	38
1.4.5. Повърхностна химия на MEMS	39
1.5. Физични свойства	39
1.6. Форми на износване.....	44
1.6.1. Абразивно износване	45
1.6.2. Ерозивно износване	47
1.6.3. Кавитационно износване	50

1.7. Заключение.....	52
----------------------	----

Глава 2.

Технология на трибологичните изследвания. Устройства и експериментално оборудване. 53

2.1. Съществуващи методи и видове трибологични изследвания на полимери и композити	55
2.2. Устройства за изследване на микротвърдостта на полимерни материали	56
2.3. Апаратура за изследване на коефициента на възстановяване - високоскоростна камера NAC MEMRECAM HX6.....	64
2.4. 3D технологии, материали и устройства за печат.....	64
2.4.1. Отлагане на разтопен материал (FDM или FFF)	66
2.4.2. Фотополимеризация - Стереолитография (SLA) и процес на печат PolyJet.....	67
2.4.3. Селективно лазерни процеси	68
2.4.4. Директно метално отлагане (DMD)	71
2.4.5. Тримерно отпечатване (3DP)	73
2.4.6. Струйна технология (Inkjet)	74
2.4.7. Наслаяване на листов материал (LOM – Laminated Object Manufacturing)	74
2.4.8. 3D ТЕХНОЛОГИИ ИЗПОЛЗВАНИ В ИЗСЛЕДВАНЕТО	75
2.5. Полимери и композити за 3D печат.....	79
2.5.1. Видове пластмаси за 3D печат.....	81
2.5.2. Видове смоли за 3D печат.....	87
2.6. EDEM Software	88
2.7. Заключение.....	88

Глава 3.

Съставяне на методики за провеждане на изследванията..... 91

3.1. Методики за 3D принтиране	92
3.1.1. Съставяне на методика за 3D принтиране на плочки.....	96
3.1.2. Съставяне на методика за 3D принтиране на цилиндри	97
3.1.3. Съставяне на методика за 3D принтиране на сферични тела	98
3.2. Методика за анализи на микротвърдостта на полимери и композити	100
3.3. Методика за изследване на трибологични свойства на полимери и композити получени чрез 3D принтиране	104
3.4. Методика за създаване на симулация в среда на EDEM Software	107
3.5. Заключение	109

Глава 4.

Експериментални резултати и изследвания на 3D полимерни

материали, включително композитни 111

4.1. Резултати от изследваните коефициентите на триене на 3D отпечатани проби 111

4.1.1 Коефициент на триене при плъзгане 112

4.1.2. Коефициент на триене при търкаляне 116

4.1.3. Коефициент на възстановяване 118

4.1.4. Изследване и приложение на трибологични характеристики на 3D принтирани материали за тактилните възприятия на хора в неравностойно положение..... 120

4.2. Резултати от изследването на микротвърдостта на материалите 124

4.3. Симулационни изследвания на 3D отпечатани проби с EDEM софтуер..... 133

4.4. Заключение..... 139

Глава 5

Насоки за бъдещи изследвания 141

5.1. Усъвършенстване на методиките за 3D принтиране 141

5.2. Разширяване на изследванията на механичните и трибологичните свойства 141

5.3. Усъвършенстване на симулационните модели 142

5.4. Приложение в инженерната и социалната практика за подобряване на живота и на зрително увредени хора..... 142

5.5. Развитие на научно-приложната база 142

5.6. Заключение..... 143

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 144

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ 146

БИБЛИОГРАФИЯ 147

ДЕКЛАРАЦИЯ ЗА ОРИГИНАЛНОСТ..... 162

Публикации по дисертационната тема 163

ПРИЛОЖЕНИЯ 164

Приложение 1..... 165

Приложение 2..... 171

Благодарности

Имах честта да бъда първият редовен докторант на проф. д-р инж. Николай Стоименов, който щедро споделяше своя богат опит, знания и професионализъм. Неговата подкрепа, насоки и търпение бяха безценни по време на целия процес на изследванията и оформянето на настоящия труд. Благодарение на неговата експертиза и постоянен ангажимент успях да се ориентирам в сложността на темата и да реализирам поставените научни цели.

Дълбоки благодарности и към доц. д-р инж. Любен Клочков от Техническия университет – София за цялостната подкрепа и насоки през годините на следването ми, както по време на бакалавърската, така и на магистърската подготовка. Без стабилната основа, която той ми предостави, настоящият дисертационен труд нямаше да бъде възможен. Неговото внимание, търпение и професионализъм оставиха трайна следа в развитието ми като изследовател и учен.

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.

В контекста на глобалната устойчивост традиционните субтрактивни методи често се свързват с отрицателни въздействия върху околната среда поради техните удължени производствени цикли и време за изпълнение, които са силно енергоемки и ресурсоемки [1]. Адитивния метод (АМ) предлага възможност за устойчиви решения за обработка с икономически и екологични ползи [2]. Също така АМ увеличава гъвкавостта на дизайна, позволявайки производството на сложни части, което води до намалени загуби на материали и производствени разходи. FDM\FFF техниката измества границите на производството на високоефективни материали към бърз и рентабилен маршрут с ефективна обработваемост [3,4].

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 характеризирание на използваните 3D принтери.
8. Да се реализират и анализират експериментални изследвания.

Използвани съкращения

AM – Адитивен метод

FDM – Fused Deposition Modeling

FFF – Fused Filament Fabrication

SLA – Stereolithography

DLP – Digital Light Processing

SLS – Selective laser sintering

SLM – Selective laser melting

DMD – Direct Metal Deposition

3DP – Three-dimensional printing

LOM – Laminated Object Manufacturing

ABS – Acrylonitrile Butadiene Styrene (Акрилонитрил бутадиен стирен)

PLA – Polylactic Acid (Пполимлечна киселина)

PVA – Polyvinyl Alcohol (Пластмаса с поливинил алкохол)

PETG – Polyethylene terephthalate glycol (полиетилен терефталат гликол)

HIPS – High Impact Polystyrene (удароустойчив полистирол)

CAD - Computer-Aided Design

Използвани термини

1. Адитивен метод - Адитивният метод (АМ) е процес на създаване на обекти чрез добавяне на материал слой по слой. Този метод е основата на адитивното производство и позволява изграждането на сложни геометрични форми, които трудно могат да бъдат постигнати с традиционни производствени техники [4].
2. Адитивно производство - Адитивното производство, известно и като 3D печат, представлява набор от технологии, които създават физически обекти от цифрови модели. Процесът обикновено включва добавяне на материал, като пластмаса, метал или други вещества, в предварително определени слоеве, за да се изградят детайли и комплекти. Използва се в различни индустрии, включително автомобилната, аерокосмическата и медицинската [5,6].
3. Субтрактивен метод - Субтрактивният метод е производствен процес, при който материал се отстранява от блок или детайл, за да се получи желаната форма или размер. Този метод включва техники като струговане, фрезование и шлифование. Разликата с адитивния метод е, че тук материалът се отнема, а не добавя [7,8].
4. Субтрактивно производство - Субтрактивното производство е традиционен метод, при който части от материал (метал, пластмаса, дърво и др.) се премахват, за да се създадат финалните продукти или компоненти. Често се използва в индустриалното производство и обработка на материали, като съществуват множество машини и инструменти за този тип производство [9,10].
5. Трибология - Трибологията е науката за триенето, износването и смазването на повърхности при относителни движения. Тя изучава механичните взаимодействия между твърди, течни и газообразни вещества, което е от решаващо значение за дизайна и функционирането на различни механични системи [11].
6. Трибо-система - Трибо-системата е концепция, използвана за описание на взаимодействия между трите основни компонента на трибологията: повърхностите в контакт (например части от машина), течността, която ги смазва, и условията на натоварване. Тази система е важна за разбиране и управление на проблеми като износване, триене и смазване.
7. Трибологични процеси - Трибологичните процеси се отнасят до явленията на триене, износване и смазване, явяващи се по време на движението и взаимодействието между различни повърхности. Разбирането на тези процеси е ключово за проектиране на дълговечни и ефективни механични системи и избягване на повреди и неефективност.
8. Абразия - износването на твърда повърхност е резултат от надраскване поради твърди частици или неравности, които се притискат към насрещната повърхност при относително движение. При условия на смазване нежеланите замърсители в смазочните материали като мръсотия, песъчинки и метални частици също могат да причинят абразия.

9. Абразивно износване - отстраняване на материал или деформация на повърхността, причинена от твърди частици или неравности на твърда повърхност, притиснати и движещи се по по-мека твърда повърхност. Обикновено се характеризира с повърхностни бразди и драскотини.
10. Абразирана повърхност (или триеща се повърхност) - твърда повърхност, която е засегната от прогресивна загуба на материал поради износване.
11. Добавка - съединение, което се добавя към базова смазочна течност, за да подобри някои съществуващи функции или да въведе някои нови. Често използваните добавки са против износване, антиоксиданти, инхибитори на корозията, потискащи пяната, подобрители на индекса на вискозитет и други.
12. Адхезия - Адхезията се отнася до взаимодействието и свързването между различни материали на молекулярно ниво. Тя определя способността на две повърхности да се залепят една за друга при контакт. Адхезията е важна в много приложения, включително в производството на лепила, покрития и композитни материали.
13. Коефициент на адхезия - Коефициентът на адхезия е числово значение, което характеризира силата на свързване между две повърхности. Той описва относителната способност на материалите да се залепват помежду си. Висок коефициент на адхезия сигнализира за добро сцепление, докато нисък показва слаб контакт.
14. Теория на адхезията - Теорията на адхезията включва научните принципи, които обясняват механизмите на залепване между различни материали. Тази теория разглежда фактори като повърхностна енергия, грубост на повърхността и химическите взаимодействия, които влияят на адхезивните свойства на материалите.
15. Адхезивно износване - Адхезивното износване е процес, при който материал от една повърхност се премества към друга повърхност в резултат на адхезията между тях. Обикновено това се случва, когато условията на триене са ниски, но контактните повърхности все пак водят до механичен трансфер на материал.
16. Адсорбция - Адсорбцията е процес, при който молекули от газ или течност се прикрепят към повърхността на твърдо тяло. Тази междуповърхностна реакция води до филм върху твърдата повърхност, което може да окаже влияние на физичните и химичните свойства на материала.
17. Агломерация - Агломерацията е процес, при който малки частици се събират и образуват по-големи агрегати или агломерати. Този процес е важен в много индустриални приложения, включително производството на прахови материали, керамика и други.
18. Отгряване - Отгряването представлява процес на нагряване на метал или друг материал след извършване на определена обработка, за да се премахнат стресовите и да се подобрят механичните свойства на материала. Отгряването може да се използва за подобряване на изнosoустойчивостта и пластичността.
19. Добавки против пяна - Добавките против пяна са химически вещества, които се използват за предотвратяване или намаляване на образуването на пяна в течности. Тези добавки се използват в различни индустриални процеси, като например в

производството на храни, козметика и химически продукти, за да се подобри ефективността и да се намали загубата на материал.

20. **Номер против износване** - Номерът против износване е числен показател, който характеризира устойчивостта на материал на износване. Този номер може да се определи въз основа на тестове, които оценяват представянето на материала под специфични условия.
21. **Неравност** - Неравността се отнася до вариации в повърхността на материал, които могат да въздействат на механичните свойства, триенето и адхезията. Тези неравности могат да бъдат микроскопски или макроскопски и значително влияят на взаимодействията между повърхностите.
22. **Базова течност** - Базовата течност е основният компонент на смазочни или охлаждащи системи, в които могат да бъдат разтворени добавки за подобряване на определени свойства (като например противоизносни или корозионни качества). Тази течност играе ключова роля в трибологичните процеси и функционирането на машини и устройства.
23. **Окисление** - Окислението е химичен процес, при който един материал (обикновено метал) реагира с кислород, като образува оксиди. Този процес може да доведе до разрушаване на материала, намаляване на неговата здравина и устойчивост. Окислението е важен процес в корозията на метали, катализаторите и многобройни химически реакции.
24. **Инхибитор на окислението** - Инхибиторите на окислението са химически вещества, които забавят или предотвратяват окислителните реакции. Те се използват широко в индустрията за защита на метали, материали и козметични препарати от корозия и деградация. Примери включват органични съединения, лесно свързващи се с кислорода и образуващи защитни слоеве.
25. **Оксидативно износване** - Оксидативното износване се отнася до износването, причинено от химически реакции между повърхностите на материалите и кислорода. Този вид износване често се наблюдава в системи, работещи при високи температури и налягания, и може да променя физичните и механичните свойства на материалите.
26. **Износване на пилинг** - Износването на пилинг е форма на механично износване, при която малки частици или слоеве от материал се отлепват или износват от повърхността на даден компонент. Това може да бъде причинено от повтарящи се натоварвания или триене, което води до образуване на дупки или пукнатини.
27. **Точково износване** - Точковото износване е специфичен вид износване, при който материалът се износва в определени точки или области от повърхността, а не равномерно. Това може да бъде резултат от локално повишено налягане или триене, което води до неравномерно износване и може да доведе до нарушения на функционалността на компонента.
28. **Абсолютен вискозитет** - мярка за вискозитета на определена течност при определени условия (обикновено температура). Течностите с висок абсолютен вискозитет са по-лепкави и затрудняват движението си, докато течностите с нисък вискозитет са по-

течни. Абсолютният вискозитет е важен в приложението на смазочни и охлаждащи вещества.

29. Полимеризация - Полимеризацията е химичен процес, при който малки молекули (мономери) се свързват за образуване на големи молекули (полимери). Този процес е основен в производството на пластмаси и синтетични влакна. Полимеризацията може да протече по различни механизми, включително добавъчна и кондензационна полимеризация.
30. Храпов механизъм - Храповият механизъм е механизъм, който позволява предаване на движение в едно направление, докато блокира движението в противоположната посока. Този механизъм се използва в различни устройства, като например храпови ключове и механизми на часовници.
31. Масло - Масло или мазна течност се отнася до вискозно вещество, което се използва за смазване, охлаждане и защита на механични системи. Маслата могат да бъдат от растителен, животински или минерален произход и играят ключова роля в увеличаването на дълготрайността на машините и намаляване на триенето.
32. Масло минерал - Минералното масло е вид масло, получено от нефта чрез преработка. То се използва широко в различни промишлени приложения, включително в смазвателни системи и автомобили, заради своите добри смазващи и термични свойства.
33. Масло синтетично - Синтетичното масло е специфичен вид масло, което е произведено чрез химични процеси, а не чрез преработка на природен нефт. То предлага предимства като по-добра стабилност на вискозитета, по-добро представяне при високи температури и по-добро защита срещу окисление в сравнение с минералните масла.
34. Трибомертър - Трибомертър е уред, който се използва за измерване на триенето между различни повърхности. Той предоставя информация за триенето и взаимодействията между материалите при различни условия, като температура, налягане и скорост. Трибомертрите са важни в научните изследвания и индустриалните приложения, за да се оценят свойства като сцепление и устойчивост на износване.
35. Вискозитет - Вискозитетът е мярка за съпротивлението на течностите на деформация и течене. Той описва плътността и течливостта на течностите, като вискозитетът е по-висок за по-гъсти течности (например, мед) и по-нисък за по-течливи (например, вода). Вискозитетът е важен в контекста на смазочните материали и хидравличните системи.
36. Ерозия - Ерозията е процес на износване или разрушаване на повърхността на материали, който се дължи на въздействието на външни фактори, като вода, вятър, химични вещества или механично триене. Този процес може да доведе до значително намаляване на личността и функционалността на материалите и е важен фактор, който трябва да се вземе предвид в архитектурата и строителството.
37. Кавитация - Кавитацията е процес, при който се образуват малки, краткотрайни области на ниско налягане в течност. Тези области, когато се образуват, могат да се

разрушат, като произвеждат силни ударни вълни. Кавитацията често се среща в хидравлични системи и помпи и може да причини сериозно механично износване.

38. Кавитационно износване - Кавитационното износване се отнася до разрушаването на повърхността на материалите, причинено от кавитацията. Когато bubbles (балони) от кавитация колабира, те предизвикват шокови вълни, които могат да „изядат“ метала или повърхността на материала, причинявайки поражения и износване.
39. Кавитационна ерозия - Кавитационната ерозия е специфичен вид ерозия, причинена от кавитационни явления. Тя предизвиква разрушаване на повърхностите на материалите, особено в любимите части на хидравлични устройства, вътрешни помпи или метали, когато те са в среда, където се проявяват кавитационни ефекти.
40. Покритие - Покритието представлява слой от материал, приложен върху повърхността на друг материал, с цел подобряване на неговите свойства, като например устойчивост на корозия, триене, износване или естетичен вид. Покритията могат да бъдат боядисващи, метализиращи, полимерни или всякакви други видове, зависещи от предназначението.
41. Коефициент на триене - Коефициентът на триене е числово значение, което характеризира съотношението между сили на триене и нормалната сила, действаща между две повърхности при контакт. Този коефициент влияе на ефективността на механичните системи и играе важна роля при проектирането на устройства и машини.
42. Коефициент на триене при плъзгане - Коефициентът на триене при плъзгане е специфичен тип коефициент на триене, който описва съотношението на триенето, когато две повърхности плъзгат една спрямо друга. Той е важен за оценка на ефективността на смазочни системи и за оптимизация на механични системи.
43. Коефициент на триене при търкаляне - Коефициентът на триене при търкаляне е аналогичен на коефициента на триене при плъзгане, но описва триенето, когато една повърхност се търкаля върху друга. Обикновено коефициентът на триене при търкаляне е по-нисък от този при плъзгане, което го прави важен за приложения, като колела и лагери.
44. Коефициент на възвръщаемост или реституция - Коефициентът на възвръщаемост или реституция е мярка за способността на материал да се върне в първоначалната си форма след деформация. Този коефициент показва колко от енергията, използвана за деформация, може да се възвърне при отпускане на сила. Високият коефициент показва добри еластични свойства на материала.
45. Корозия - Корозията е химически процес, при който материали, обикновено метали, се разрушават в резултат на взаимодействие с околната среда, особено с влага и кислород. Корозията може да доведе до сериозни структурни повреди и е важно да се вземе предвид при проектиране и поддръжка на конструкции и механизми.

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 нова интердисциплинарна наука, изучаваща триенето, износването и смазването на контактните повърхности, които се движат една спрямо друга. Инженерната трибология има ключова, критична роля в много индустриални приложения. От автомобилната и самолетостроителната индустрия до производството на машини и подемно-транспортна техника, трибологията помага в оптимизирането на производството, удължаването на експлоатационния живот на компонентите и намаляването на енергийния процент[12,13,14].

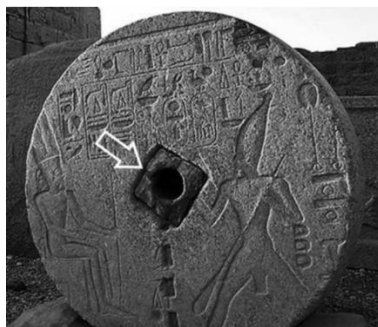
Трибологията като наука предоставя основите за развитие на нови технологии и материали с подобрени трибологични характеристики. Развитието в тази област има потенциал да доведе до значителни подобрения в производителността, устойчивостта и ефективността на различни индустриални системи.

Днес трибологията е ключова за ефективността и надеждността на почти всички механични системи. Нейната роля е толкова значима, че загубите от триене и износване могат да достигнат 5–7% от БВП на една държава, което обуславя непрекъснатото търсене на нови материали, покрития и смазки за постигане на по-висока устойчивост и ефективност [15].

1.1.1.Историческо развитие на трибологията

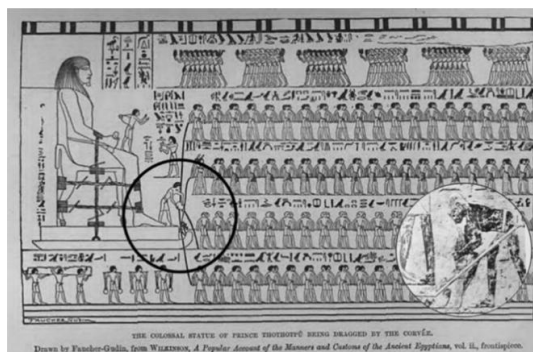
Трибологията е изследване на науката и инженерството на взаимодействащи повърхности в относително движение и включва изучаването и прилагането на принципите на триене, смазване и износване. Терминът „трибология“ произлиза от гръцкия термин “tribos”, което означава триене, така че буквалното значение би било „наука за триене“ [12,13,14]. Леонардо да Винчи първи формулира закони за триенето, но работата му остава непубликувана, а същественото развитие настъпва едва през XX век с индустриалния растеж и необходимостта от по-добро разбиране на износването и смазването.

Исторически трибологията е сред най-старите приложни науки, използвана още от древните египтяни за строителство и транспорт. В палеолита триенето е било приложено за запалване на огън и изработка на оръжия и инструменти. Съществуват данни, че естествен битум е служил като смазка в колела преди около 5000 години. Археологически находки от Египет (Мезолит) показват използването на лагери при грънчарски колела за намаляване на триенето (Фиг. 1.1).



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

Също така произведения на изкуството от гробницата на Джехутихотеп в Ел Бершех (1800 г. пр. н. е.) подкрепят тезата, че древните египтяни са били първите пионери в използването на смазочни материали при транспортирането на големи каменни строителни блокове и паметници, както е показано на фиг. 1.2.

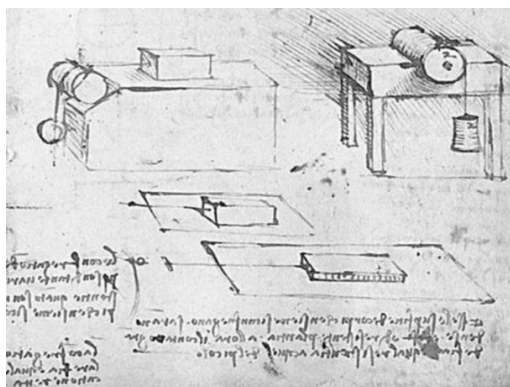


Фиг. 1.2. Транспортиране на египетска статуя, El Bersheh, около 1900 г. пр.н.е.

Илюстрацията показва транспортиране на колосална статуя от Средното кралство (до 600 kN) върху дървени дъски. На нея се вижда мъж, често наричан „първият триболог“, изливащ течност (вода или масло) пред шейната за намаляване на триенето [16]. Според Dowson (1998) един роб може да тегли около 800 N, което предполага коефициент на триене $\sim 0,23$ – близък до стойностите при смазано дърво [17]. В същия период са използвани органични лубриканти, като в колесница от египетска гробница са открити остатъци от животински мазнини, смесени с кварц и съединения на алуминий, желязо и вар [18].

Колелото се смята за едно от най-значимите открития – известно е от ок. 3500 г. пр.н.е., а останки от колела от III хилядолетие са намерени в Европа, Африка и Азия. В близост до Рим е открит 2000-годишен аксиален сачмен лагер, вероятно използван за въртене на статуи при скулптуриране.

Научното изследване на триенето започва по-късно – Леонардо да Винчи (1450–1600) пръв формулира закона, че силата на триене е пропорционална на нормалното натоварване и независима от контактната площ (Фиг. 1.3). Сред ранните постижения е и дизайнът на сачмени лагери – предшественици на съвременните лагери.



Фиг. 1.3. Чертеж на геометрията на теста за триене на шейна, Леонардо да Винчи (1452-1519).

Въпреки че Леонардо да Винчи е пионер в изследването на триенето, неговите ръкописи остават непубликувани и без историческо влияние. През 1699 г. Амонтонс формулира първите „законали на триенето“ за сухи плоски повърхности (Amontons, 1699). Ойлер (1707–83) въвежда математическа дефиниция на коефициента на триене и разграничението между статично и кинетично триене, а Кулон (1785) установява, че след началото на движение силата на триене е независима от скоростта (Coulomb, 1785)[19, 20, 21].

В началото на XX в. Hardy & Hardy (1919) и Tomlinson (1929) възразяват хипотезата за адхезията [22, 23], а през 1930-те нараства убеждението, че триенето се дължи на междуповърхностни сили, а не само на неравности (Глава 15, 1985). Bowden & Tabor (1950) и Holm (1938) доказват, че реалната контактна площ определя триенето[24, 25]. Днес то се изследва и на атомно ниво.

Износването като научна тема е по-младо. Първи значими трудове са на Holm (1946) и Bowden & Tabor (1950), а последните десетилетия донесоха напредък чрез модерни измервателни техники [26, 24]. Съвременни инженерни продукти доказват, че контролът на износването е ключов.

Развитието на смазването е тясно свързано с петролната индустрия. Още през XIX в. Beauchamp Tower (1884), Reynolds (1886) и Petroff (1883) поставят основите на теорията за хидродинамичното смазване, което днес е основа за проектиране на надеждни лагери [27].

1.1.2. Кратък преглед на трибологията в България

В България изследванията на триенето, като важен аспект на механиката, започват целенасочено през 1963 г. в Лабораторията по „Контактна механика“, основана от професор д-р Георги Данов в Техническия университет в София [28]. През 1974 г. трибологията формално се утвърдена като самостоятелна дисциплина, когато Лабораторията по „Контактна механика“ се преобразува в „Лаборатория по трибология“, под ръководството на професор Нягол Манолов [29]. Скоро след това, тя се трансформира в Национален координационен център за трибология. Десет години по-късно, през 1984 г., България става редовен член на Международния съвет по

трибология, който има седалище в Лондон. През 1993 г. е учредено гражданското сдружение Общество на триболозите в България (ОТБ) и Балканска трибологична асоциация (БТА), със седалище в София и първи ръководител проф. д-н Н. Манолов. Балканската трибологична асоциация, в която членуват България, Гърция, Македония, Румъния, Сърбия и Турция, организира редовни конференции на всеки три години. През 2008 г. се проведе Юбилейната VI конференция в град Созопол, под името „Балкантриб 08" (Assenova, Kandeveva, 2008)[30], по случай 15 години от създаването на Балканската трибологична асоциация. Конференцията беше организирана от Техническият университет – София (Машинно-технологичния факултет) и ОТБ. На събитието присъстваха делегати и гости от страните членки на БТА: България, Гърция, Румъния, Сърбия, Турция, както и представители от Австрия, Белгия, Беларус, Италия, Полша, Русия, Съединените щати, Франция, Хърватска и Швейцария. Бяха представени около 130 доклада, разпределени в 9 различни секции:

- Фундаментални и интердисциплинарни аспекти на трибологията
- Трибология и манифактурни процеси
- Трибология в машините и машинните елементи
- Трибохимия и механохимия
- Смазване, смазки и издръжливост
- Трибология на покриването, повърхностите и материалите
- Нано- и микротрибология
- Биотрибология и аспектите на околната среда в три-бологията
- Триботестване и трибосистеми на мониторинг.

В момента Лабораторията по трибология продължава да развива своята дейност, като активно се занимава с изследвания, подготовка на специалисти, образование и популяризиране на научните постижения. Разработена е съвременна концепция за напредъка на трибологията (Манолов и др., 2007) [31]. Тази концепция е включена в научната номенклатура под номер 01.02.02., както е публикувано в Държавен вестник, брой 34 от 1990 г [32]. Учреден е семинар на тема „Трибология и интердисциплинарност", с ръководител проф. д-р Мара Кандева, а също така е създаден Национален експертен съвет по трибология в рамките на Интердисциплинарната гражданска академия (ИНГА). В рамките на издателската дейност на ИНГА излиза списание „Контакти" (главен редактор проф. д-н Н. Манолов), което вече години наред предоставя платформа за обмен на различни идеи в сферата на интердисциплинарността, особено по отношение на контактните взаимодействия между телата [33]. Частични групи, занимаващи се с проблемите на трибологията, се формират и в някои научни институти на Българската академия на науките, както и в редица висши учебни заведения из цяла България.

1.1.3. Развитието на трибологията в света

Трибологията е широко развита в редица страни, които са водещи в научните изследвания и индустриалните иновации. Някои от страните с най-развити трибологични изследвания и приложения включват:

1.Съединени Американски Щати: САЩ имат множество водещи научноизследователски учреждения и университети, които провеждат изследвания в областта на трибологията. Също така, страната разполага с много високотехнологични индустрии, включително автомобилна, аерокосмическа и производство на енергия, които активно прилагат трибологични решения [34].

2.Германия: Германия е известна със своето висококачествено машиностроене и автомобилостроене, където трибологията играе ключова роля. Немските университети и научноизследователски институти са в челните редици на трибологичните изследвания [35].

3.Япония: Япония е водеща в иновациите и изследванията в областта на трибологията, особено в автомобилната и електронната индустрия. Тя се фокусира върху разработката на високо ефективни и надеждни машинни компоненти [36].

4.Великобритания: Великобритания има дълга история на трибологични изследвания и е дом на някои от водещите научни институции в тази област, включително Института по трибология в Университета на Лийдс [34].

5.Китай: През последните десетилетия Китай значително увеличи своите изследвания и разработки в областта на трибологията, като се фокусира върху подобряването на производствените технологии и разширяването на индустриалните приложения [37].

Тези страни предоставят значителни ресурси и инвестиции в областта на трибологията, което води до нововъведения и технологични пробиви, които повишават ефективността и устойчивостта на машините и процесите в много индустрии.

1.1.4. Индустриалното и финансово значение на трибологията

Трибологията често е била в центъра на усилията за увеличаване на наличността и надеждността, намаляване на разходите за поддръжка и удължаване на експлоатационния живот на различни индустриални области, които изискват относително движение. Трибологията има непрекъснато развитие, за да понесе индустриалната еволюция във времето. Започвайки от първата индустриална революция, известна като „ерата на парата“, до настоящата индустриална революция, „ерата на киберфизическите системи“. Много от изобретенията, получени по време на индустриалните революции, обявяват нови трибологични трудности, които трябва да бъдат преодоляни, особено на всички нива на технологията, където е включено триенето на повърхности. Следователно е разумно основната цел на трибологичните изследвания да е минимизирането на загубите от триене и износване. Освен това разбирането на трибологията от страна на инженерите и дизайнерите е задължително, за да се осигурят приемливи решения на трибологичните проблеми. Това се превръща в ключов фактор за развитието на няколко технологии като смазване, модификация на повърхността, наука за материалите и други [38]. В някои случаи тези разработки са толкова радикални, че може да се промени цялата технология на продукта. И все пак това не е лесна задача, тъй като трибологията е силно интердисциплинарна, включваща много изследователски области като физика, химия, математика и инженерство на материали. Значението на

свързването на трибологията с индустрията се аргументира в няколко публикации, включително списания, книги и конференции. Източниците съобщават за необходимостта от разработване на технологии за контрол на триенето и износването, като се вземе предвид устойчивостта за енергийна революция в индустрията [39]. Възобновяеми смазочни материали, смазване при поискване, био-трибология, повърхностно текстуриране, микро/нано-трибология, покрития против износване, повърхностна модификация, зелена трибология и неметални насипни материали са определени като най-важните текущи и бъдещи изследователски разработки на индустриалната трибология.

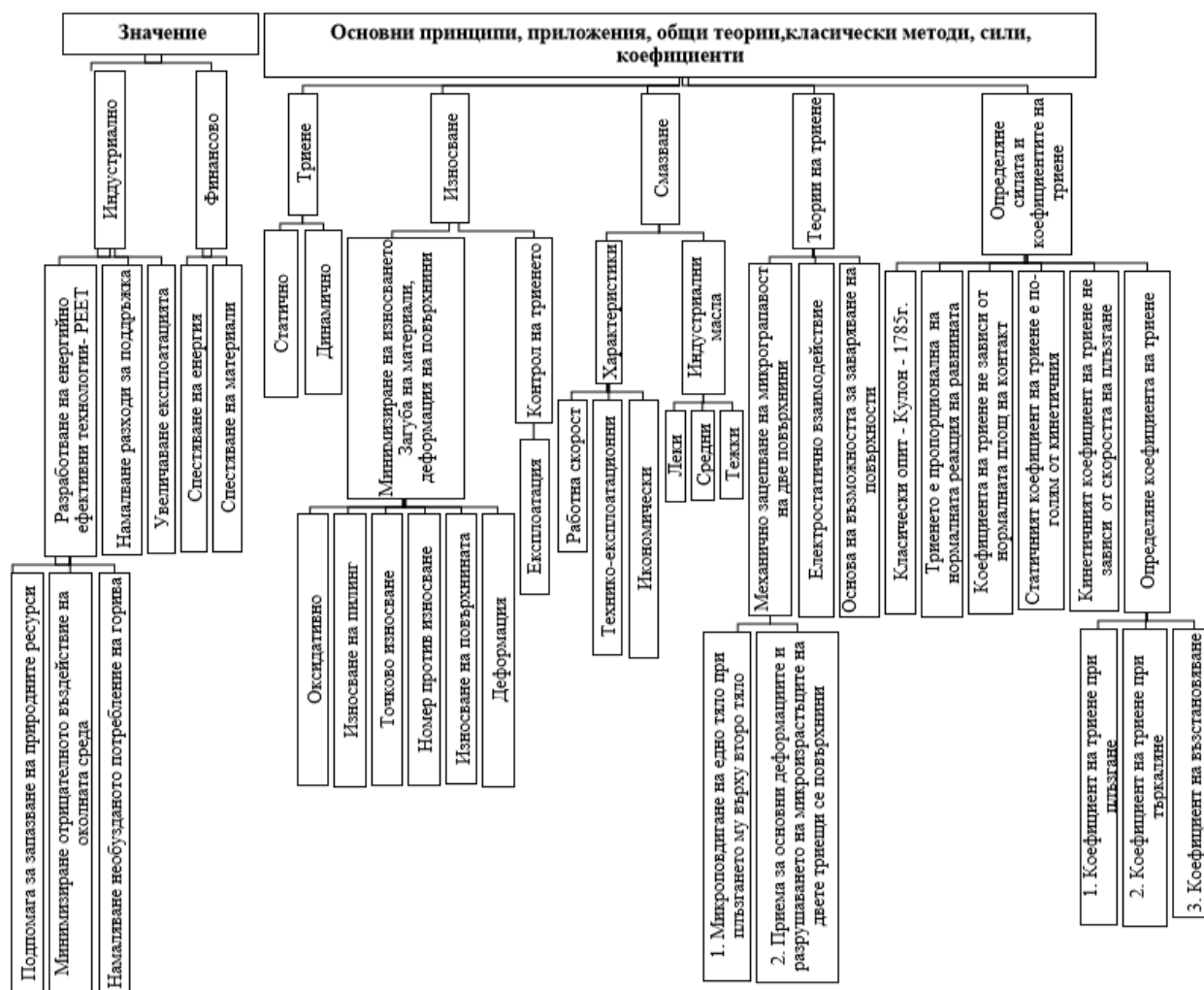
Триенето води до енергийни загуби, а износването – до загуба на материал, което общо поражда значителни икономически разходи. Следователно финансовото значение на трибологията започва с идеята за спестяване на енергия и материали. Съобщава се, че приблизително 23% от общото световно потребление на енергия произхожда от трибологични контакти [40]. От тях 20% са за преодоляване на триенето (енергия) и 3% за повторно производство на износени части и резервно оборудване поради износване и свързано с износването (материал). Един прост пример за икономическия ефект от премахването на триенето в машините може да се намери в анализ, който разкрива, че снабдяването на 3 милиона 7,5 KW червячни предавки, работещи в Съединените щати, със смазка позволява относително увеличение от 5% на механичната ефективност в сравнение с конвенционалните минерални масло. Годишните спестявания на енергия биха били 9,8 милиарда KW-часа, а съответната стойност на тази енергия е 0,6 милиарда щатски долара.

В световен мащаб разработването на нови технологии за контрол на триенето и износването потенциално би намалило загубите на енергия с 40% в дългосрочен план (15 години) и с 18% в краткосрочен план (8 години). В глобален мащаб тези спестявания биха възлизали на 1,4% от brutния вътрешен продукт БВП годишно и 8,7% от общото потребление на енергия в дългосрочен план [41]. Що се отнася до износването, внедряването на нови трибологични технологии в индустрията на Обединеното кралство е основен фактор за потенциални икономически спестявания с до 95% за 10 години. В момента съответните спестявания са около 1,39% от БВП на brutния национален продукт. Интересно е да се спомене, че гореспоменатите спестявания вече бяха предвидени в доклада на Jost преди повече от 50 години [42].

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 ежедневно ежедневие срещаме множество примери за трибологични приложения. Например: писане с молив на хартия, почистване на повърхности с четка, използване на пила за нокти, смазване на скърцащи панти с масло и много други. Следователно, трибологията като наука се фокусира върху взаимодействията между твърди повърхности в относително движение и обхваща три основни области: триене, износване и смазване. Оттук произтичат разнообразни приложения в различни

индустрии, като производство, транспорт, медицина, космос и други. 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" [43]. На фиг. 1.5. е представена илюстрация на триъгълника на трибологията.

Обикновено взаимодействието между твърди повърхности е изключително сложно и се изисква познание в различни дисциплини и области. Те могат да включват, но не се ограничават до, физика, химия, приложна математика, механика на твърдите тела, механика на флуидите, термодинамика, топлопредаване, наука за материалите, реология, смазване, проектиране на машини, производителност и надеждност. Освен това, има и

допълнителна сложност, тъй като трибологията е силно свързана с широк спектър от практически приложения, при които теоретичната формулировка е ограничена. Ако се опитаме да проучим основните съставки на трибологията на взаимодействието между твърди повърхности, ще осъзнаем, че триенето и износването са много древни явления.



Фиг.1.5. Триъгълник на Трибологията

1) Триене

Триенето е естествено явление, което играе значителна роля в нашето ежедневие. В зависимост от условията на експлоатация, може да се изисква както високо, така и ниско триене. Въпреки това, в изследванията на трибологията, триенето обикновено се разглежда като основна причина за износване и загуба на енергия в плъзгащите се системи. Думата за пръв път е използвана през 16-ти век и произлиза от латинската "frictio", която означава "триене" или "отерване", и от среднофренската "friction", която е съществително от действието на "fricare", означаващо "да се търка". За пръв път използването на термина "триене" за описание на "съпротивление на движението" е документирано през 17-ти век (Речник; Оксфорд). В различни дефиниции за това явление се въвеждат две основни режима на триене: (1) статично триене, което предшества началото на относителното движение между две твърди повърхности, и (2) кинетично или динамично триене, което се проявява между две движещи се повърхности. За да разграничим просто двата случая, при статичното триене силата, генерирана между двете твърди повърхности, е достатъчна, за да се устои на движението, докато при динамичното триене тя е недостатъчна. И в двата режима триенето се изразява в количествени термини като силата, генерирана между двете твърди повърхности в посока, противоположна на посоката на относително движение (за кинетично триене) или потенциално движение (за статично триене) [44].

2) Износване

Износването се счита за основна причина за загуба на материал и/или деформация на повърхността, което в крайна сметка може да доведе до повреда на механичните компоненти. Думата "износване" е използвана в края на 13-ти век по отношение на облекло, за да обозначи тяхното постепенно влошаване поради продължителна употреба. В трибологията, износването е свързано с деформацията и постепенното отстраняване на материал от твърда повърхност в резултат на механични и химични действия на повърхността-срещащ [46].

Сред различните прояви на този процес, износването може да бъде дефинирано като "прогресивна загуба на вещество от работната повърхност на тяло в резултат на относително движение на повърхността" [47, 48, 49]. В зависимост от свойствата на повърхността и условията на експлоатация, различни механизми на износване могат да преобладават в контактните тела, като адхезивно, абразивно, повърхностна умора, ударно, трение, ерозия и корозионно износване. От инженерна гледна точка, износването обикновено се разглежда като нежелано явление, което наистина се наблюдава в по-

голямата част от практически случаи. Въпреки това, това не винаги е вярно. Всъщност, съществува значителен брой полезни приложения на процеса на износване. Например, производството на повърхности и завършването им чрез абразивни процеси, както и използването на молив или тебешир, са примери за желателно износване. Така че, на практика, износването не винаги трябва да бъде избегнато.

От незапомнени времена са предприемани усилия за подобряване на гладкостта на движението на обект върху повърхност, както и за минимизиране на износването и контрол на триенето. Това предизвиква необходимостта от въвеждане на вещество, флуид или твърд филм, за да се намали контактът между движещите се повърхности.

3) Смазване

Смазването е ефективен метод за намаляване на триенето и контрол на износването. Терминът произлиза от латинското *lubricatus* („да се направи хлъзгаво“) и се дефинира като „субстанция, способна да променя взаимодействието на контактните повърхности“ (Oxford Dictionary). Смазочните средства не са само течни масла, а включват грес, твърдо смазване и смазване с въздух или газове.

Течностното смазване се характеризира с вискозитета на смазочния агент и се разделя на смазване с течен филм, гранично и смесено смазване. Греста представлява стабилизирана смес от течен агент и сгъстител с възможни добавки за специфични свойства. Твърдото смазване включва нанасяне на мек филм между повърхности или се получава чрез химични реакции. Смазването с въздух или газ е подходящо за високи скорости.

Основната цел на смазването е намаляване на триенето, износването и повредите на повърхностите, както и контрол на температурата в трибосистемите. При неуспех на смазването настъпва директно триене между твърдите повърхности, което може да доведе до локални повреди и отказ на системата [45].

- Смазочни материали

Смазването е ефективен метод за намаляване на триенето и контрол на износването. Терминът произлиза от латинското *lūbrīcātus* („да направя хлъзгаво“) и се дефинира като „вещество, способно да променя взаимодействието между контактните твърди частици“. Смазочните средства включват течности, грес, твърдо смазване и въздушно или газово смазване.

Течното смазване зависи от състоянието на смазката и се разделя на смазване с течен филм, гранично и смесено смазване, като ключово свойство е вискозитетът. Греста е стабилизирана смес от течност и сгъстител с възможни добавки за специални свойства. Твърдото смазване представлява мек филм между повърхностите или резултат от химична реакция. Въздухът и газовете се използват при високоскоростни приложения.

Основната цел на смазването е намаляване на триенето, износването и адхезията, както и контрол на температурата в трибосистемите. При повреда на смазването настъпва директен контакт между повърхностите, което води до високо триене, топлина и потенциални повреди като локално заваряване, прехвърляне на материал или отказ на системата. [46].

Добро смазване на подвижните детайли и възли в машини е ключово за оптималното протичане на производствените процеси. Основните функции на смазочните материали

са намаляване на триенето и износването, спестяване на енергия, предотвратяване на корозия, отвеждане на топлина и почистване на контактните повърхности. Асортиментът от индустриални смазочни материали непрекъснато се разширява за различни отрасли.

Добрата смазка е сред най-лесните, но често пренебрегвани мерки за повишаване на производителността и намаляване на престоя на машините. Ключово е правилният подбор на смазочно масло за конкретното приложение, тъй като неправилно избран продукт може да доведе до неудовлетворителна работа и повреди на оборудването. Поддържането на смазочния материал в добро състояние е от съществено значение за ефективна и стабилна работа на машините.

- *Характеристики на маслата*

Индустриалните смазочни масла се предлагат в разнообразни видове и форми, като изборът на подходящо масло е критичен за съответното приложение, особено при различни отраслови стандарти и норми. Производителите разработват специализирани масла, които отговарят на конкретни изисквания, включително намаляване на триенето и износването, защита от корозия, отвеждане на топлина и добро уплътняване.

Поради разнообразните условия на работа и специфичните производствени процеси, много индустриални масла съдържат добавки за подобрени експлоатационни свойства като антиокислителни и защитни функции. Специалните масла често имат удължен експлоатационен срок, до 2–4 пъти по-дълъг от този на стандартните масла. При избор на масло е важно да се определи дали ще се подменя периодично или ще служи през целия експлоатационен период, което определя необходимостта от общо предназначение или специален синтетичен смазочен материал.

Маслата с общо предназначение са базирани на дестилатни или остатъчни минерални масла или техни смеси, използвани както за стандартно промишлено смазване, така и като базови масла за производството на смазки с добавки.

Според начина на получаването си смазочните материали се делят на минерални, синтетични и смесени (Фиг.1.6.). Минералните масла са получени на основата на нефта, синтетичните съответно по изкуствен път, а смесените съдържат нефтена и синтетична компонента.



Фиг.1.6. *Схема на смазочните материали*

Съставът оказва съществено влияние върху свойствата на маслото, върху необходимостта от използването на различни присадки, легиращи вещества, съгъстители, пълнители, а и върху цената му.

За производството на смазочни вещества се използват предимно базови минерални масла от дестилация на суров нефт. Парафиновите масла имат висок вискозитетен индекс (~ 90) и температурна стабилност до $177\text{ }^{\circ}\text{C}$, докато нефтените масла имат по-нисък вискозитетен индекс (≤ 40), но добра стабилност при ниски температури до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Някои растителни масла (рапично, слънчогледово) могат да се използват, но са ограничени от тесен температурен диапазон и по-висока цена.

Синтетичните масла са химически създадени вещества или смеси с по-добри технически характеристики от минералните, но по-скъпи. Полусинтетичните масла комбинират синтетични и минерални компоненти и са по-евтини от чисто синтетичните.

За повишаване на технико-експлоатационните характеристики базовите масла съдържат прибавки (от част от процента до $25\text{--}35\%$), които могат да образуват молекулярни разтвори, колоидни разтвори, суспензии или емулсии. В индустриалните масла се използват добавки с антифрикционно, противозадирно, противоизносно, антикорозионно, антиокислително и вискозитетно действие.

Индустриалните масла се класифицират като леки, средни и тежки и според българските стандарти са: машини с общо предназначение (БДС 5291), редукторни (БДС 13134), трансмисионни (БДС 9797) и турбинни (БДС 5972). Основните категории са масла, греси и пасти, като маслата съдържат $\sim 95\%$ базово масло и 5% добавки, гресите – масла със сапун за плътна структура, а пастите – масла, добавки и твърди смазочни материали.

Ключовите показатели за избор са вискозитет, химически състав, температура на втвърдяване, стабилност, противоизносни, противозадирни и антикорозионни свойства, като най-важният е вискозитетът. Вискозитетът определя дебелината на смазочния слой и способността на повърхностите да понесат натоварване. Той се влияе основно от температурата, по-малко от налягането, и се оценява чрез вискозитетен индекс (по БДС 5665). Температурата на втвърдяване показва при каква стойност маслото губи подвижността си; депресори се добавят за намаляване на тази температура.

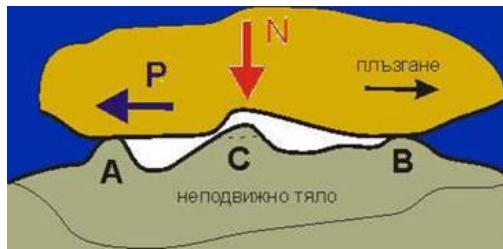
При избора на масло е важно да се отчетат работната скорост, видът на триенето, натоварването, околната среда и стандартите. Цената не трябва да бъде основен критерий; по-важни са намаляване на престои, енергийни разходи и повишена производителност. Важно е да се има предвид, че масло, успешно използвано в едно приложение, не гарантира същите резултати в други условия, тъй като всяко приложение е специфично [51].

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.

а) *Теории за механичното зацепване* - Тези теории са основани на механичното зацепване на микрограповостите на двете повърхности, така, както е показано на фиг.1.7. Една група теории приема, че силите на триене се обясняват с

микроповдигането на едното тяло при плъзгането му върху второто. Друга група теории приема за основни деформациите и разрушаването на микроиздътъците на двете триещи се повърхности.



Фиг. 1.7. Теории за молекулярното взаимодействие

Установено е, че в някои случаи атомите от едното тяло “прихващат” атоми от другото тяло в областта на контакта. В този случай съпротивителната сила се явява като резултат на разкъсване на междуетомните връзки при плъзгане на контактните повърхности.

- б) *Теория за електростатичното взаимодействие* - Съгласно тази теория, съпротивителната сила се поражда от поток електрони между заредените повърхности с различна полярност в зоната на контакта. Предполага се, че тези заряди притеглят повърхностите една към друга с електростатични сили.
- в) *Теория, основана на възможността за “заваряване” на повърхностите* - При тази теория се предполага, че голямото налягане, което може да настъпи в околността на контакта на микроиздатините, става причина за свързване на материалите на двете триещи се повърхности. При плъзгане тези свързани области трябва да бъдат срязани, от където произтича и съпротивителната сила.

Въпреки че общите теории се основават на явления, близки до физическата същност на триенето, те рядко се излагат подробно в учебните курсове по “Техническа механика”, поради сравнително сложния си аналитичен апарат. Обикновено анализът на този процес се основава на класическите закони на триенето.

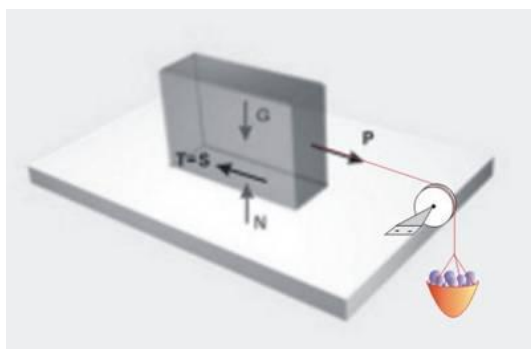
1) Класически опит за определяне на силата на триене

Първите наблюдения върху проявите на сухо триене при твърдите тела са проведени от Кулон (1785г.). Една класическа постановка на опита за определяне на силата на триене е наблюдаване на плъзгането на паралелепипедно тяло с тегло G върху хоризонтална равнина (плот, фиг.1.8). В единия край на тялото е приложена постепенно-нарастваща сила P . Това може да стане, като на едната стена се закрепим гъвкава нишка, която се прехвърля през ръба на плота с помощта на макара, а на другия ѝ край има съд с тежести (например оловни топчета). С постепенното увеличаване на тежестите се осъществява постепенно нарастване на силата P , която се стреми да задвижи тялото (в

случая на фиг.1.8 - на дясно). Едновременно с това в областта на контакта на тялото с равнината се формира съпротивителна сила S (в случая на фиг.1.8 - на ляво).

При това се наблюдават следните етапи:

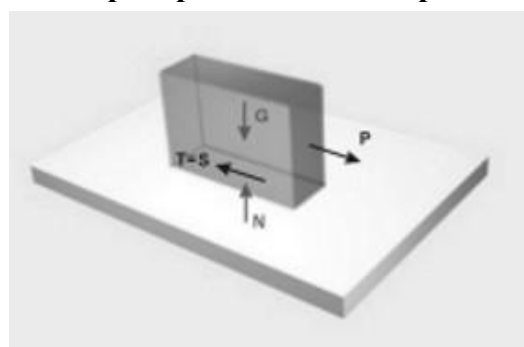
- В началото тялото остава в покой, което означава, че съпротивителната сила уравнисява активната сила P , или $S=P$.
- При увеличаване на силата P настъпва момент, в който тялото преминава в движение, което означава, че съпротивителната сила е достигнала максималната си стойност и по-вече не може да уравнисява силата P . Тази максимална стойност се нарича сила на триене в покой при тенденция за плъзгане T_0 . По-нататък процесът преминава в триене при движение, а силата на триене се означава с T .



Фиг.1.8. Класическа постановка на опита за определяне на силата на триене

Кулон е провел този опит многократно при различни условия и е установил следните класически закони на триенето:

2) Силата на триене е пропорционална на нормалната реакция на равнината.



Фиг.1.9. Класически опит обясняващ силата на триене при плъзгане

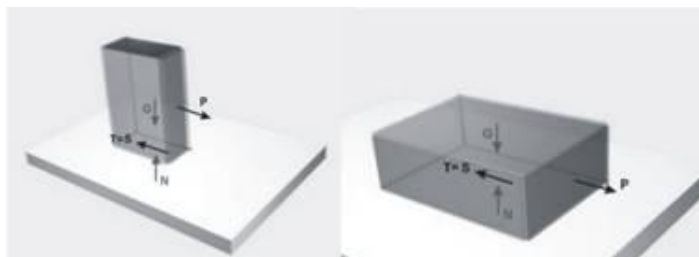
В разглеждания случай на хоризонтална равнина, нормалната реакция N е равна на теглото G на тялото (фиг.1.9.). Аналитичният израз на закона е:

$$T_0 = \mu_0 N \quad \text{и} \quad T = \mu N, \quad (1)$$

където μ_0 е коефициент на триене в покой при тенденция за плъзгане (статичен коефициент на триене), а μ е коефициент на триене при движение (кинетичен коефициент на триене). Като коефициент на пропорционалност между величини с еднаква размерност, коефициентът на триене няма дименсия.

3) Коефициентът на триене не зависи от номиналната площ на контакта.

Ако същият опит се проведе като тялото се постави да контактува с равнината по някоя от другите си страни, както е показано на фиг.1.10., силата T_0 остава същата.



Фиг.1.10. Класически опит за триене при плъзгане на тяло върху равнина в различни позиции

- Статичният коефициент на триене е по-голям от кинетичния.
- Кинетичният коефициент на триене не зависи от скоростта на плъзгане.

4) Определяне на коефициента на триене

Един от начините за определяне на коефициента на триене μ_0 е от класическата опитна постановка, като се регистрира максималната съпротивителна сила. Тогава от уравнение (1) се получава $\mu_0 = T/N$. Тъй като в опита участват две тела (трибо-двойка), то и полученият коефициент на триене ще важи само за комбинацията на техните материали. Когато понякога се казва, че "коефициентът на триене за стоманата е 0.15", това означава, че този коефициент важи за триене на стомана върху стомана. За илюстрация на порядъка на числото μ_0 може да се спомене, че например за плъзгане на стомана върху лед то е 0.027, а на кожа върху чугун е 0.28. Подробни данни се съдържат в съответните справочници [52, 53].

Представените таблица 1.1. и таблица 1.2. са взети от - Коефициенти на триене по "Теоретична механика", Божидар Тошев, Техника, 1973 [52].

Таблица 1.1. Взаимодействие на трибо-двойки при плъзгане

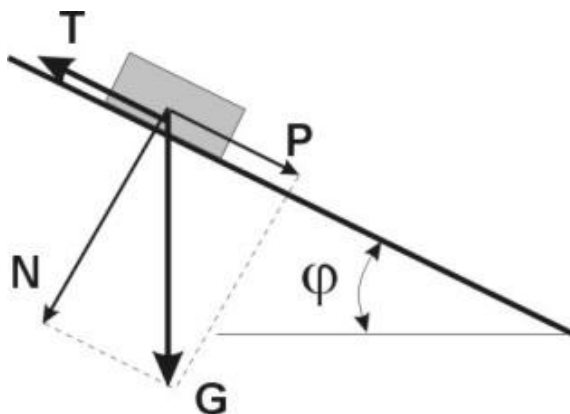
Двойка (при плъзгане)	При покой	При движение
Стомана - Чугун	0.15	0.1
Стомана - Лед	0.017	0.014
Стомана - Дърво	0.55	0.4
Дърво - Дърво	0.65	0.35
Дърво - Камък	0.7	0.3
Кожа - Метал	0.6	0.25

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

При друга опитна постановка тялото се поставя свободно върху равнината, която се наклонява спрямо хоризонта под ъгъл φ (фиг.1.11.). Ъгълът φ се увеличава постепенно до момента в който тялото започне да се плъзга по равнината (анимация). В този момент се приема, че активната сила P , предизвикваща движението, се уравнишава със силата на триене T_0 , която се противопоставя на движението ($P=T_0$). Активната сила P е компонентата на силата на теглото, успоредна на равнината: $P = G \sin \varphi$. Компонентата на силата на теглото, нормална на равнината е $N = G \cos \varphi$. Така от уравнение (1) $T_0 = \mu_0 N$, за коефициента на триене се получава:

$$T_0 = P = \mu_0 N, \text{ от където } \mu_0 = P / N = G \sin \varphi / G \cos \varphi, \text{ или } \mu_0 = \tan \varphi \quad (2)$$



Фиг.1.11. Схема на опитна постановка на тялото поставено свободно върху равнина

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 фолия и листове (≤ 0.5 mm)	Главно за контрол на качеството
ASTM D1894-24	Пластмасови фолия	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

Таблица 1.6. Допълнителни параметри и стандарти

Параметър	Стандарт	Област на приложение
Износване	ASTM G99	„Pin-on-Disk“ метод за плъзгане; измерва и коефициент на триене
Абразия	ASTM D4060	Taber Abraser – устойчивост на органични покрития
	ASTM G65	Суша пясъчно-каучукова абразия (Dry Sand/Rubber Wheel)
Адхезия	ISO 8510, ASTM D903	„Peel“ тест за лепила и свързващи слоеве

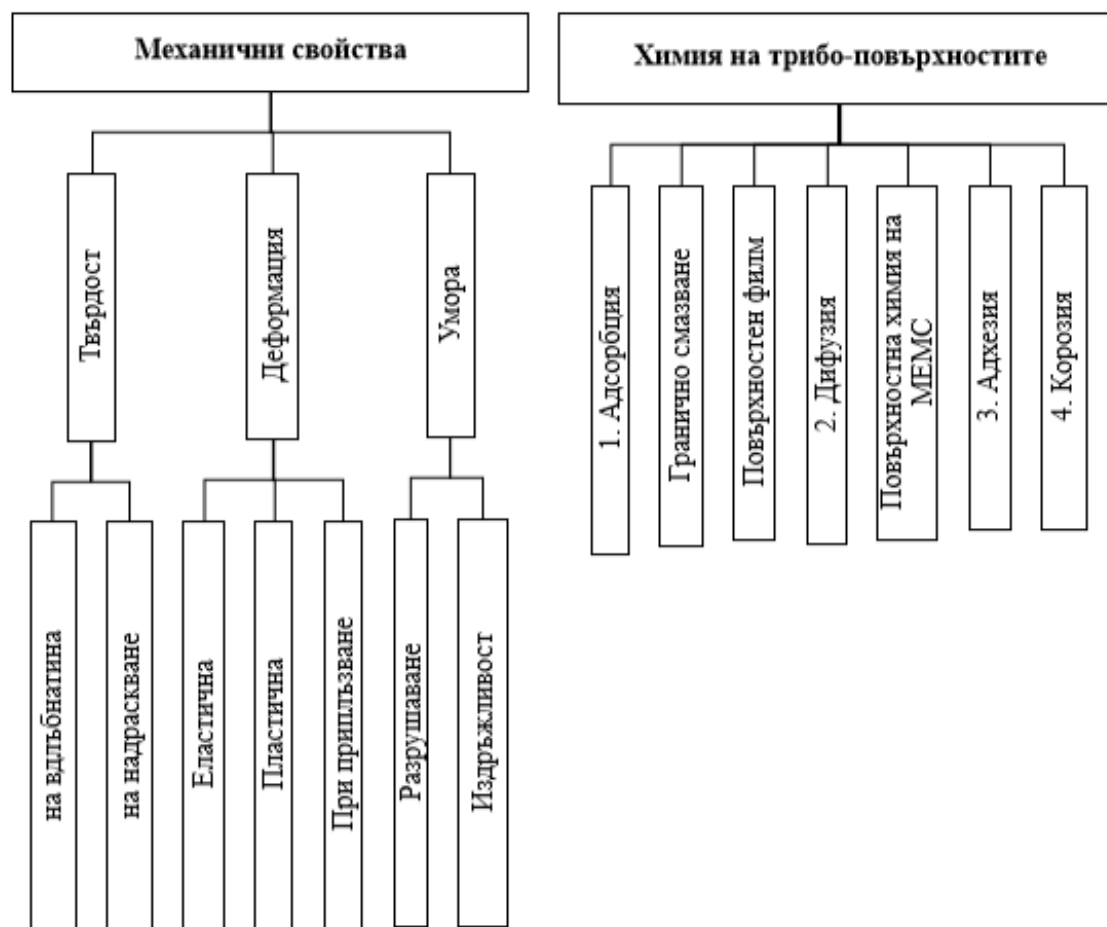
1.3. Механични свойства

Създадена е класификация на механичните свойства и химията на трибо-повърхностите, показана на фиг.1.12. В частта, посветена на механичните свойства, са разгледани основни характеристики като твърдост, деформация, умора и издръжливост. Твърдостта е диференцирана според начина на въздействие – на вдлъбнатина и на надраскване. Деформацията е разделена на еластична и пластична, като са посочени и специфични прояви като при приплъзване и разрушаване. Издръжливостта е представена като ключов показател за поведението на материалите при продължително механично натоварване.

Другият дял от схемата е посветен на химията на трибо-повърхностите. Тук са включени основните процеси, протичащи при контакт на повърхности, като адсорбция, образуване на гранично смазване и повърхностен филм, както и явленията на дифузия. Разгледана е също повърхностната химия на микроелектромеханични системи (MEMS), където взаимодействията на повърхностно ниво имат критично значение. В схемата са включени и явленията адхезия и корозия, които оказват силно влияние върху трибологичното поведение на материалите.

По този начин схемата систематизира основните механични и химични фактори, които определят поведението на повърхностите при триене, износване и контактни

взаимодействия, и показва връзката между физико-механичните характеристики на материалите и протичащите върху тях химични процеси.



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

1.3.1. Твърдост

Твърдостта е свойство на материала, което определя способността му да устои на постоянна деформация или проникване при локална вдлъбнатина. Твърдостта в Наръчника за метали често се определя като "устойчивост на материала на пластична деформация", обикновено чрез вдлъбнатина. Материалът с по-висока твърдост означава, че има по-голяма устойчивост на деформация при приложеното натоварване. Има три често срещани вида твърдост в зависимост от методите на измерване: твърдост на вдлъбнатина, твърдост на надраскване и твърдост на отскок.

1) Твърдост на вдлъбнатината

Стойността на твърдостта на вдлъбнатината за метали може да бъде измерена чрез дълбочината на вдлъбнатината или вдлъбнатината. Има три най-често срещани метода за тестване на вдлъбнатини; те са тестът за твърдост по Бринел (ВН) (Международен, 2017a), тестът за твърдост по Рокуел (НВ) (Международен, 2017b) и тестът за твърдост по Викерс (НВ) (ASTM International, 2017) [54] [55] [56][57]. В зависимост от вида на

изпитването могат да се използват различни индентори като диамантен пирамид, топка от закалена стомана или топка от волфрамов карбид. Има много примери за разговорни таблици за преобразуване на стойности на твърдост между трите метода на изпитване. Независимо от това, точността на тези таблици зависи от точността на предоставените данни и получените в резултат съвпадения на кривите. В допълнение към предишните изпълнения, тестът за твърдост по Рокуел може да се приложи за измерване на твърдостта на керамични субстрати, съгласно ASTM E-18 [58].

Чрез прилагане на две различни натоварвания (малки и големи натоварвания), разликата в дълбочината на вдлъбнатината може да бъде създадена и измерена с помощта на часовник. По този начин твърдостта може да се разчете директно със стандартните таблици за преобразуване на твърдостта. За пластмасови материали обикновено се използват тестът за твърдост по Рокуел и тестът за твърдост по Шор (SH). Струва си да се спомене, че и двата метода осигуряват само емпирична стойност на твърдостта, която не е непременно свързана с други основни свойства. За "твърди" полимери (като найлон, поликарбонат и полистирен) често се използва твърдостта на Рокуел или скалата на Shore D, докато скалата на Shore A може да се използва за "мека" гума (Mutton & Watson, 1978) [59]. Фигура Тестът за твърдост на вдлъбнатина може да бъде най-добрият представител при оценката на материали за трибо приложения. Това произтича от факта, че геометрията на типично повърхностно взаимодействие, при което една повърхност с грапави неравности се притиска към друга, е доста подобна на геометрията, която преобладава по време на тест за твърдост на вдлъбнатина. По този начин параметърът за пластична якост, който най-добре характеризира якостта, която материалът показва при плъзгане, е неговата твърдост на вдлъбнатина [60].

По отношение на ситуациите на абразивно износване, твърдостта често се счита за най-важният параметър на материала за избор или проектиране на материали, устойчиви на абразия. Въпреки това, няма толкова проста, количествена връзка между твърдостта и устойчивостта на абразия. Причината е, че твърдостта обикновено е свойство на материала, докато износването при абразия не е постоянна величина на материала, а зависи от много променливи като свойствата на абразивните среди, външни натоварвания, температура и други условия на околната среда. В случай на повърхностно закалени материали или усъвършенствани нисколегирани стомани, където умишлено присъстват множество фази, материалите показват градуирани свойства в зависимост от дълбочината, тоест промяна на твърдостта като функция на дълбочината под повърхността. По този начин, за трибологични приложения, повърхностната твърдост H_s (или твърдостта на абразивните частици, H_a) често трябва да се разглежда заедно с обемната твърдост H [61,62,63].

2) Твърдост на надраскване

Тестът за твърдост на надраскване се използва главно за изследване на едноцикличните процеси на деформация в материала чрез триене от една точка (върха на стилуса), както и неговите зависимости от различни параметри на материала. Тестът включва натискане на писеца при определено нормално натоварване върху плосък

образец и преместване на писеца или образца. Получената дълбочина на канала или размерът на отпечатъка се използва за изчисляване на числото за твърдост на надраскване (HSp) или за характеризиране на устойчивостта на износване. Като цяло числото на твърдостта на надраскване е по-подходяща мярка за устойчивост на абразия на материала от квазистатичните числа на твърдост. Освен това апаратът с махало се използва и чрез прикрепване на стилуса или единичен зърнест елемент към махалото. Когато махалото се пусне с известно количество енергия, върхът на писеца или песъчинките ще проникнат в образца на определена дълбочина, което ще доведе до жлеб.

- 3) *Твърдост на отскок* - определя се чрез измерване на височината на отскока на стандартно падащ тежък предмет; по-голяма височина на отскока сочи по-твърд и еластичен материал.

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 [64]. Еластичната деформация се определя от модула на еластичност на Йънг (E) (Roylance, 2001). При превишаване на определен праг настъпва пластична, тоест постоянна деформация [65]. При изпитване на опън напрежението се изчислява като приложената сила, разделена на първоначалната площ на напречното сечение, а деформацията – като удължението на образца, разделено на първоначалната му дължина [66]. Първоначалната еластична област се характеризира с линейна връзка между напрежение и деформация до пропорционалната граница (P) [67]. След този момент общото напрежение включва еластичен и пластичен компонент, като еластичната деформация доминира до достигане на границата на провлачване (Y) [68]. Наклонът на еластичната област се нарича модул на еластичност или модул на Йънг (E) и се описва от закона на Хук [69].

2) Пластична деформация

В кривата напрежение-деформация, показана на фиг. 1.13., 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. Промяната от еластично към пластично състояние обикновено става постепенно. Пресечната точка е донякъде двусмислена и може да се характеризира с границата на еластичност, границата на пропорционалност или границата на провлачване от 0,2%. В случай на пластична деформация, връзките между атомите на материала могат да се считат за прекъснати. Въпреки това се установяват нови връзки, които са толкова стабилни, колкото и първоначалните. Следователно, след освобождаване на товара, новата конфигурация ще се запази и деформацията е постоянна. Независимо от това, ако не се установят нови връзки, настъпва счупване при

максимална номинална стойност, наречена крайна якост на опън (σ_u) или крайна якост. Съответното натоварване е максималното натоварване, което материалът може да понесе, точка (U) на кривата напрежение-деформация. Освен това пластичната деформация често води до остатъчни напрежения, които впоследствие могат да повлияят на някои дългосрочни механични свойства, като устойчивост на умора. Ако остатъчното напрежение е натиск, устойчивостта на умора на компонента ще се увеличи, обратното [70].



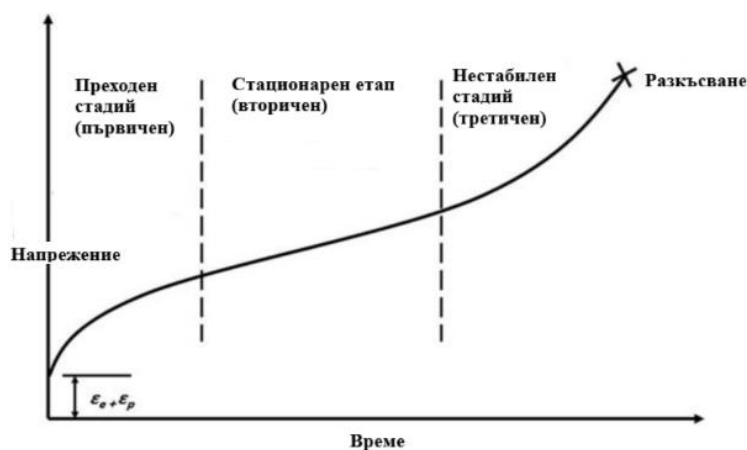
Фиг. 1.13. Типична крива напрежение-опън

Пластичната граница на провлачване на металите може да се определи или чрез тест за опън, или чрез тест за твърдост чрез вдлъбнатина. За много метални материали, измерената микротвърдост чрез вдлъбнатина е около 3 пъти границата на провлачване, измерена от теста за опън. Наложително е да се спомене, че критерият за провлачване, следователно пластичният поток, обикновено се обсъжда, без да се отчита ефектът от скоростта на натоварване или скоростта на деформация. Някои инженерни материали обаче могат да покажат силна пластичност, зависима от скоростта на деформация, която е известна като чувствителност на скоростта на деформация на материала или вискоеластичност. Индексът на чувствителност към скоростта на деформация (m) се използва като количествена мярка за описване на чувствителността на скоростта на деформация на материалите [71]. Чувствителността към скоростта на деформация е свойство на материала и става важно особено при меки метали като олово и суперпластични материали.

3) Деформация при пълзене

Деформацията при пълзене е поведението на зависим от времето материал. За разлика от мигновената еластична и пластична деформация, както беше въведено по-рано, деформацията на пълзене се натрупва с времето, тъй като приложеното натоварване се поддържа непроменено. Дефинира се като "прогресивна деформация на материал при постоянно напрежение". Подобно на пластичното счупване при изпитвания на опън, разкъсване при пълзене може да възникне при изпитвания за пълзене, тъй като деформацията при пълзене продължава с времето до точката, в която настъпва повреда или счупване на материала. Независимо от това, "якостта на разкъсване при пълзене" зависи от времето и се записва както с напрежението, така и с времето. Друга зависима от времето ситуация, която трябва да се има предвид при инженерния дизайн, е деформацията на материала при циклично натоварване при повишени температури. В този случай процесът на умора в материала може да бъде вредно ускорен поради взаимодействието пълзене-умора [72, 73].

Взаимодействието при пълзене-умора може да се обясни с комбинацията от два механизма на повреда, че повредата от пълзене ще възникне особено на прекъснати места във вътрешната структура на материалите, като например границите на зърната, което причинява намаляване на пластичността на материала и следователно допринася за ускоряването от нарастване на пукнатини или увреждане от умора. Физическите механизми, причиняващи увреждане от пълзене на твърди материали, включват дифузия на атоми, свободни места или дислокации по начин, зависим от времето. Типично поведение във времето на деформация по време на пълзене при постоянно натоварване е дадено на фиг. 1.14. Обикновено три етапа могат да бъдат идентифицирани на кривата на пълзене, а именно преходен етап, етап на стабилно състояние и етап на нестабилност. Незабавна еластична и евентуално пластична деформация възникват в преходния етап, последвани от постепенно натрупване на деформация на пълзене в стационарния етап. И накрая, на нестабилния етап или третичния етап, деформацията започва да се ускорява и накрая води до разкъсване.



Фиг. 1.14. Типично поведение на зависимостта от деформация и време по време на пълзене под постоянно натоварване

Деформация при пълзене обикновено се очаква при материали с ниска твърдост и якост, като полимери, поради относително слабата връзка между верижните му

молекули. В кристални материали като метали, пълзенето е силно зависимо от температурата и се превръща във важен механизъм за повреда само при високи температури, особено когато температурата на материала достигне 0,3 до 0,6 пъти от абсолютните му температури на топене [74]. Некристалните материали като стъкла и аморфни полимери пълзят по по-сложен начин. Когато температурата е относително ниска (под температурата на встъкляване), настъпва деформация на пълзене, включваща движението на молекулни вериги и деформацията на пълзене постепенно се възстановява и в крайна сметка може да изчезне, когато приложеното напрежение се премахне. Когато температурата е над температурата на встъкляване или се доближава до температурата на топене, възниква деформация при пълзене под формата на вискозен поток като много гъста течност и деформацията обикновено не може да се възстанови напълно [75,76].

1.3.3. Умора

Анализът на умората е от жизненоважно значение за проектирането и функционирането на всяка инженерна част или компонент и приблизително повече от 80% от повреди в механичното обслужване са свързани с това явление [74]. Първоначално беше обърнато внимание в началото на 1800 г. от изследователи в Европа, които забелязват, че компонентите на моста и железопътната линия се напукват при циклични натоварвания. Това явление е описано за първи път, а именно умората, през 1839 г. от J. V. Poncelet в книгата му "Индустриална механика", за да изрази отслабването на структура поради редуване на напрежение и компресия.

1) Разрушаване поради умора

В компонент, подложен на циклично (или променливо) натоварване (или напрежение), може да се появи пукнатина от умора на повърхността на пробата с размер в микронен мащаб, последвано от разпространение на пукнатина, което расте непрекъснато под всеки цикъл на натоварване до критичен размер на пукнатината и накрая води до отказ от умора. На практика тези пукнатини или потоци често започват рано в експлоатационния им живот или могат да съществуват предварително в компонент, въведен в производствения процес. Повреда поради умора вероятно възниква при нива на напрежение, които са много по-ниски от якостта на опън на материала, която е измерена при натоварване на опън само с един цикъл. Умората може също да е резултат от повтарящо се нагриване и охлаждане, което може да причини циклични топлинни напрежения, когато термичното разширение/свиване е ограничено. Това се нарича термична умора. В ситуации на умора методът на механиката на счупването често се прилага за изследване на проблемите с умората. Прогнозирането и предотвратяването на отказ от умора е основен аспект на дизайна на машината и конструкцията, които са подложени на циклично натоварване или вибрации. Това вероятно ще бъде постигнато чрез добро разбиране на основния механизъм, контролиращ възникването и нарастването на пукнатината от умора, както и зависимостта му от условията на работа и околната среда.

2) Издръжливост на умора

Издръжливостта на умора обикновено се разделя на два етапа: (1) зараждане на пукнатини и (2) разпространение (нарастване) на пукнатини. В етапа на възникване на пукнатини може да има и растеж на микропукнатини, които са твърде малки, за да бъдат наблюдавани. В етапа на разпространение на пукнатината, пукнатината расте бавно, но често по стабилен начин, последвано от бързо нарастване на пукнатината до пълна повреда. Важно е да се спомене, че възникването и разпространението на пукнатини могат да се управляват от различни механизми и следователно трябва да се третира отделно [74].

1.4. Химия на трибо-повърхностите

Химията на трибо-повърхностите или повърхностната химия се занимава с трибологичното изследване на процесите, протичащи между повърхностите в контакт. Това изследване обхваща и реакциите между трибо-повърхностите и околната среда, която може да бъде течност, газ и вакуум. На трибо-повърхността се случват много явления като адсорбция, дифузия, адхезия, повърхностни сили и химични реакции. С други думи, повърхностната химия или повърхностната реактивност е външно свойство, което прави повърхността на материала и интерфейсите предпочитана среда за химични процеси [77]. При изучаването на химията терминът реактивност е сравнително неясна концепция и включва както кинетични, така и термодинамични фактори, които се прилагат за определяне на скоростта и способността на химичните реакции. Всъщност тези фактори са различни и обикновено зависят от температурата. Повърхностната химия обикновено се проявява на молекулярно ниво, където повърхностните атоми имат различна химична ситуация от тази на масивния материал. Следователно, повърхностните атоми обикновено показват висока способност за химическа реакция. Препоръчва се адсорбцията да е поне една от стъпките на тези реакционни механизми [78].

1.4.1. Адсорбция

Адсорбцията е известна като процес на прилепване на атоми, йони или молекули към повърхността на материала, а именно адсорбента. Това се различава от „усвояването“. Последното се отнася до процеса, при който частиците навлизат в обемната фаза на материала. Адсорбцията може да се класифицира в два вида въз основа на силата на взаимодействие между трибо-повърхността и средата; физическата адсорбция, наричана още физисорбция, се причинява от слаба сила на Ван дер Ваалс, а химическата адсорбция, наричана също хемосорбция, се постига чрез химически връзки между адсорбент и адсорбат. В технологията на смазване, изключително за гранично смазване, адсорбцията върху трибо-повърхности и последващите промени в повърхностната химия са ключови за работата на смазочните материали и повърхностните добавки [79].

1.4.2. Гранично смазване

Граничното смазване се счита за едно от най-екстремните работни условия в областта на трибологията и е било предизвикателство за трибохимиците през миналия век.

Процесът на адсорбция е основният механизъм за образуване на гранични филми. Беше забелязано, че смазването може да се постигне в долния край на кривата на Stribeck, например, при условия на изключително високо натоварване и/или ниска скорост. В този случай дебелината на смазочния филм обикновено е много малка, обикновено с няколко молекулни слоя. При граничното смазване терминът химическа реактивност (или трибохимия) обикновено се използва за описание на химичните реакции, които влияят върху образуването на смазващ филм върху трибо-повърхностите при плъзгащ се контакт [80]. Според теорията на монослоя за гранично смазване, разработена от Харди (Hardy & Bircumshaw, 1925) [81], директният контакт между плъзгащите се повърхности се избягва от адсорбираните и ориентирани молекули, залепени върху трибо-повърхности. Образуваните монослоеве от молекули ще допринесат за по-ниско триене поради тяхната ниска якост на срязване, което по този начин защитава свързващите се повърхности, както е показано на фиг. 1.15.



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

В това състояние механизмът на износване е силно повлиян от химическата реактивност на лубриканта спрямо трибо-повърхностите. Следователно, не всички смазочни формули имат същия трибологичен ефект върху всички повърхности. Също така, реактивността на молекулите на смазката към повърхността е индикатор за възможна корозия. Обикновено високата повърхностна реактивност ще насърчи висока скорост на химична реакция, което води до корозивно износване на реагиращите повърхности [82]. Добавките обикновено се използват в търговските смазочни материали, за да позволят натрупването на граничен филм при екстремни условия на натоварване и по този начин да се постигне намаляване на триенето и защита от износване. Функцията на добавките до голяма степен зависи от химическата структура и полярността на молекулите. При гранични условия на смазване, групите добавки с полярна глава силно се прилепват към повърхността на плъзгане, докато полярната опашка остава разтворима в основното смазочно средство, което води до филм с ниско триене [83].

Силата на този филм и неговата адхезия към трибо-повърхността има силен ефект върху коефициента на триене [83]. Молекулното тегло на добавките значително влияе върху техните трибологични характеристики. Като цяло, с увеличаването на молекулното тегло на добавките, капацитетът за носене на натоварване на граничния смазващ филм се увеличава, но съпротивлението на триене намалява [84]. Напоследък биоразградимите наночастици привлякоха значително внимание като обещаващи зелени

смазочни добавки. Доказано е, че добавянето на наслоени наночастици от борна киселина (ВА) (с размер ~ 100 nm) към базовото масло води до около 30% намаление на коефициента на триене, около 40% намаление на загубите от износване в сравнение с базовото масло. Освен това товароносимостта на базовото масло също беше подобрена около 3 пъти с нано-добавки.

1.4.3. Повърхностен филм

Известно е, че почти всички метали и сплави ще образуват естествения оксиден филм във въздуха, докато понякога те образуват сулфидни, нитридни и хлоридни филми в зависимост от условията на околната среда и елементите на сплавта [49]. Дебелината на такива филми обикновено е наноразмерна, но може да варира от метал до метал в зависимост от химическата реактивност на границата между метала и околната среда. Например, типичен естествен оксиден филм, образуван върху повърхности от неръждаема стомана във въздуха, е тънък само няколко нанометра [85]. Тези филми имат забележимо въздействие върху взаимодействието между повърхностите в зависимост от химичните и механичните свойства на тези филми. Благоприятният трибологичен ефект може да се реализира при образуването на меко залепен филм, който действа като смазващ слой, като съответно разделя контактните повърхности, докато твърдите крехки филми са по-малко ефективни, тъй като са склонни да се счупят по време на работа. В теорията на Куин [86],[87], [88] процесът на окисляване на металната повърхност се засилва от локално високата контактна температура, дължаща се на нагриване чрез триене. Доказано е, че износването може да възникне, тъй като твърдият, крехък оксиден слой ще се напука и от остатъци от износване, когато дебелината му надвиши критична стойност. Съвсем наскоро, Merz, R. et al. [85] изследват механизмите за образуване на окислителния филм върху стоманената повърхност и неговото трибологично поведение при условия на околната среда. Работата предполага, че дебелият оксиден филм, образуван при плъзгане, се дължи на високата температура на пламък по време на контакт с неравности. В този случай филмът може да нарасне до дебелина в микромащаб, в сравнение с нанометровия оксиден слой върху чиста метална повърхност, разработен при атмосферни условия. Резултатите подкрепят теорията, че контактът с локална неравност ще засили окисляването на металната повърхност.

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 [89],[90],[91]. Често отгряването се използва за регулиране на микроструктурата и свойствата на материалите чрез нагриване над температурата на рекристализация, поддържане и бавно охлаждане.

При стоманите температурите на отгряване са 1050–1300°C и изискват часове за достатъчна дифузия [92]. По време на процеса атомите дифундират в материала, елиминирайки разлики в концентрацията и преразпределяйки дислокациите. Това води

до по-голяма пластичност и се прилага при компоненти, където е нужна висока устойчивост на износване и корозия [89].

Широко използвани методи са азотиране и карбуризиране за повишаване на твърдостта на повърхността. Борирането създава твърд бориден слой и подобрява устойчивостта на износване, но може да предизвика напукване поради фазовото несъответствие между FeB и Fe₂B. Затова постборидното дифузионно отгряване (DAP) се прилага за получаване на монофазна структура и по-добри механични свойства [90].

Недостатък на дифузионното отгряване е образуването на едри зърна при високи температури и бавно охлаждане, което често налага последваща нормализираща обработка.

1.4.5. Повърхностна химия на MEMS

Повърхностните свойства на микро-електро-механичните системи (MEMS) са от първостепенно значение поради тяхното изключително високо съотношение повърхност-обем. Добре установено е, че контролирането на повърхностните сили, особено адхезията между контактните повърхности, е ключов проблем при работата и поддръжката на MEMS [93]; [94]; [95]; [96]. Силите на сцепление и адхезията обикновено възникват по време на работата на устройствата MEMS, което в крайна сметка може да причини повреда на системата. Поради това са приложени няколко повърхностни обработки, за да се контролира повърхностната химия на устройствата MEMS, за да се постигне по-добра производителност. Всички те водят до значително намаляване на адхезията в зависимост от повърхностната функционалност и грапавостта на повърхността. Примери за тези подходи за лечение са:

- а) плазмено отлагане на флуоровъглеродни филми;
- б) текстурирани повърхности;
- в) водородно прекъсване с помощта на HF или NH₄F (водородно прекъсване); и
- г) образуване на самосглобени монослоеве (SAM) върху контактните повърхности [97].

Освен това влажността оказва значително влияние върху свойствата на повърхността и следователно надеждността на устройствата MEMS. Адсорбираната вода на повърхностите може да действа като смазка в системите с магнитни ленти, а поведението на триене на силиконова пластина може да бъде силно повлияно от наличието на вода. От друга страна, течният филм може също да доведе до високо статично триене и адхезия между повърхностите на MEMS, следователно образуваните водни филми могат да имат както благоприятни, така и вредни ефекти върху трибологичните характеристики на MEMS, в зависимост от повърхностните свойства на компонентите и плъзгането условия.

1.5. Физични свойства

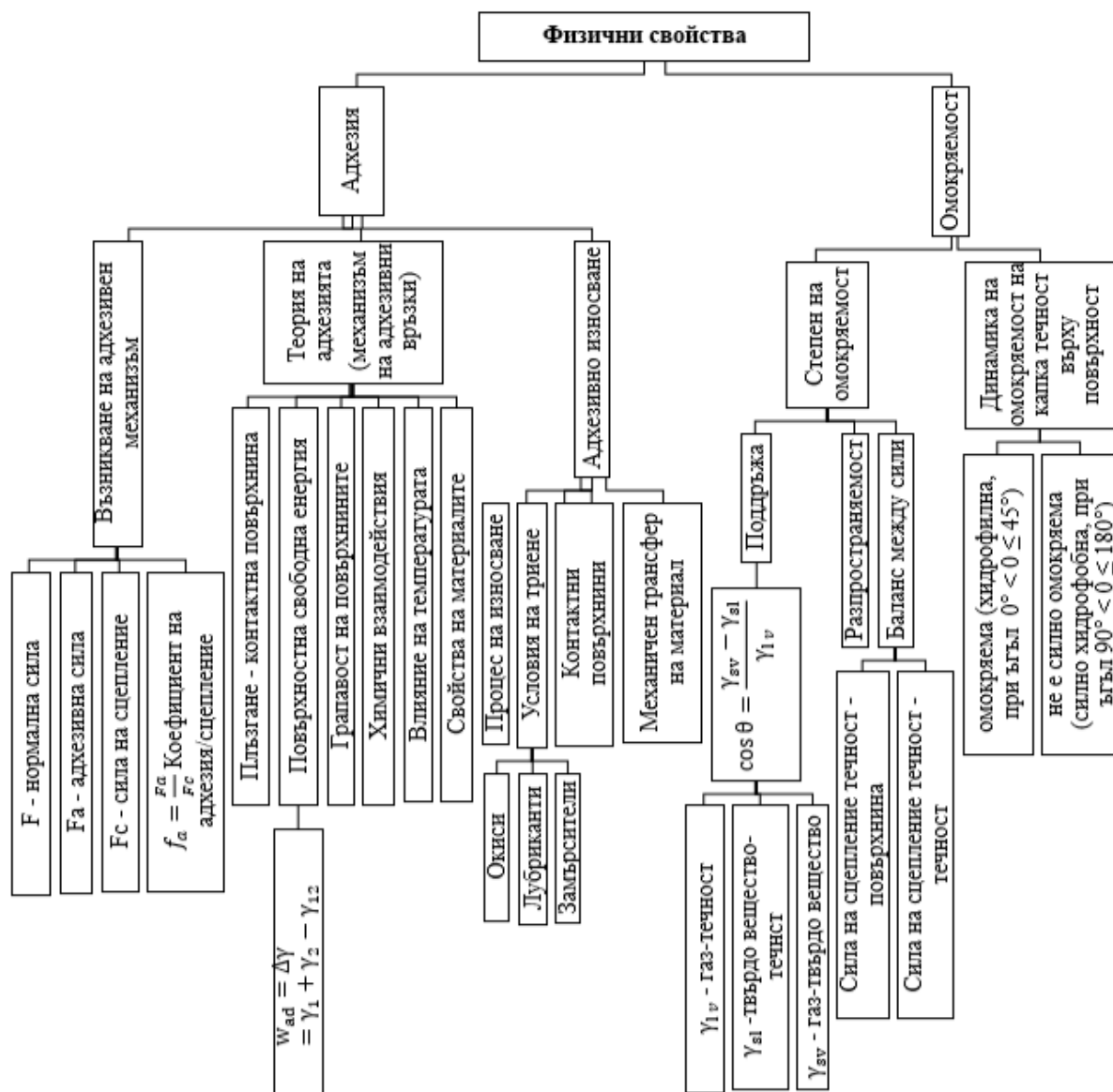
В трибологията физичните свойства на материалите и повърхностите играят решаваща роля за начина, по който се проявяват триенето, износването и смазването. Те

определят как повърхностите взаимодействат помежду си на атомно, микро- и макрониво и как се развиват процесите при реален контакт. За разлика от химичните свойства, които са свързани с реактивоспособността и промяната на състава, физичните свойства описват параметри като адхезия, грапавост, твърдост, топлинна и електрична проводимост, вискозитет и др. Именно тези свойства определят ефективността на смазочните филми, стабилността на контактните връзки и устойчивостта на материалите на износване. Познаването им позволява по-точно моделиране на контактната механика (например кривата площ-натоварване на Херц и преходът JKR-DMT [98], прогнозиране на режимите на триене (по кривата на Стрибек) и оптимизиране на избор на материали и смазки за конкретни приложения.

Създадена е класификация на физичните свойства, показана на фиг.1.16. В схемата физичните свойства са разделени на няколко основни групи, които обхващат явленията на адхезия и омокряемост. Адхезията е представена чрез взаимодействието на различни сили – нормална, адхезивна и сила на сцепление, като са включени и зависимости за изчисляване на коефициента на сцепление. Разгледани са контактните повърхностни взаимодействия, свободната повърхностна енергия, химичните взаимодействия, свойствата на атмосферата, както и поведението на материалите при обемно и повърхностно взаимодействие. Включени са също процеси като окисление, триене, контактни взаимодействия и механичен трансфер на материал.

Отделен дял в схемата е посветен на омокряемостта, която е разгледана чрез система за оценка на повърхностното напрежение, степента на омокряемост и баланса между силите. Показани са условията за пълна и непълна омокряемост, зависещи от стойностите на контактния ъгъл, както и динамиката на процеса при различни състояния на повърхността.

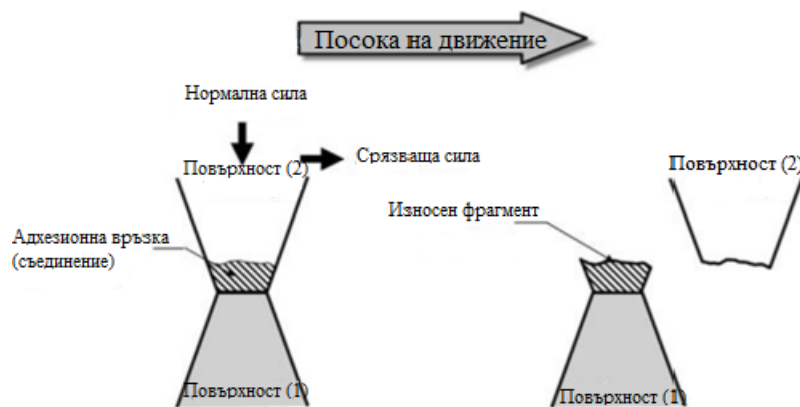
По този начин схемата систематизира основните физични свойства, свързани с адхезията и омокряемостта, и представя взаимовръзките между тях чрез формули, зависимости и ключови фактори, които определят поведението на материалите при контакт и взаимодействие с повърхности.



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

1) Адхезия

Адхезията е способността на едно вещество да се залепва към друго [99]. Тя възниква при контакт на твърди повърхности, когато действат междумолекулни сили (метални, ковалентни, водородни, йонни, ван дер Ваалсови), които формират адхезивни връзки в атомен мащаб. За разделянето на такива повърхности е необходима определена сила (адхезивна сила), като процесът често води до образуване на фрагменти от износване [100]., Фиг. 1.17. представя адхезионния механизъм.



Фиг. 1.17. Изображение на адхезивния механизъм

Коефициентът на сцепление (f_a) се определя като отношение между теглителната сила (F_a), необходима за разделяне на две повърхности, и приложената нормална сила на натиск (F_c). Той зависи от времето на контакт, скоростта на разделяне и е пропорционален на реалната контактна площ, определена от грапавостта, механичните свойства и натоварването. При по-голямо нормално натоварване реалната контактна площ и адхезионната сила нарастват. Математически коефициентът се изчислява по формулата:

$$f_a = \frac{F_a}{F_c} \quad (3)$$

Ако към нормалното натоварване се добави срязваща сила, пластичният поток увеличава реалната контактна зона и води до по-силна адхезия. Тя нараства и при високи температури заради омекване и пластичност (особено при полимери). При металите адхезията зависи и от вътрешни фактори като кристална структура, химическа активност и условия на контакт [101].

2) Повърхностната енергия

Повърхностната енергия (γ) е ключов фактор за адхезията – по-ниските стойности означават по-слаба адхезия. Замърсители, оксиди или лубриканти намаляват енергията и съответно сцеплението. Тя се определя като работа за създаване на нова единица площ (J/m^2). Класическите изследвания на Bradley (1932)[102] и Bailey (1961)[103] развиват теорията за „свободната повърхностна енергия“, като работата на адхезия (W_{ad}) между два материала се описва с формулата на Dupre:

$$W_{ad} = \Delta\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (4)$$

Където γ_1 и γ_2 са енергии на повърхностите от двата материала при контакт на единица площ, а γ_{12} е повърхностната енергия на интерфейса на единица площ.

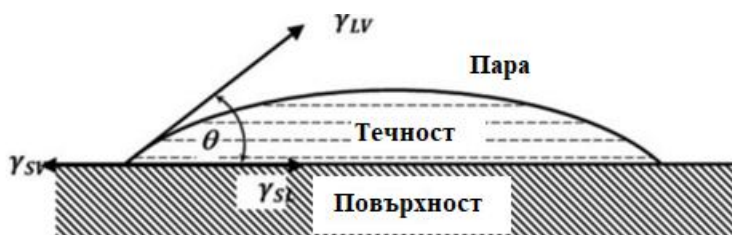
3) Омокряемост

Омокряемостта е физическо свойство, което характеризира способността на капчица течност да поддържа или да се разпространява върху твърда повърхност, което често се изразява чрез контактен ъгъл на повърхността (0), както е показано на фиг. 1.18. Както

бе споменато по-горе, контактният ъгъл (θ) се определя като ъгълът между допирателната към равнината на падане в равнината на повърхността при равновесни условия, който може да бъде получен съгласно теорията на Young [104]:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \quad (5)$$

Където γ_{sv} , γ_{sl} и γ_{lv} са междинното напрежение на газ-твърдо вещество, твърдо вещество-течност и газ-течност, респективно.



Фиг. 1.18. *Равновесие на повърхностна енергия на течна капка върху твърда повърхност.*

Контактният ъгъл може да се използва, за да се определи дали дадена повърхност е омокряема (силно хидрофилна, $0^\circ < \theta \leq 45^\circ$) или не (силно хидрофобна, $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$) [105, 106]. Разработени са различни експериментални методи за измерване на контактния ъгъл. Въпреки това, в някои ситуации е практически трудно да се измери или предскаже контактният ъгъл (напр. за много малка капчица в наномасштаб и са необходими други техники, включително метод на симулация, за количествено прогнозиране на свойствата на омокряемост) [107, 108].

На теория степента на омокряемост е резултат от баланс между две сили:

- а) сила на сцепление течност към повърхност
- б) сила на сцепление на течност към течност.

Bertrand, Blake и Coninck (2009) [109] въвеждат теоретични модели за описание на динамиката на омокряне на капчица течност. Високата повърхностна енергия и добра омокряемост (малък контактен ъгъл) улесняват формирането/задържането на филми и адхезионни връзки на границата твърдо–течно/твърдо–твърдо.

4) Грапавост и топография на повърхността

Микрогеометрията (R_a , R_q , R_z и др., дефинирани от ISO 4287) контролира реалната площ на контакт и механизма на триене/износване; статистическите модели на Грийнуд–Уилямсън свързват разпределението на асперитетите с реалния контакт.

5) Твърдост (indentation hardness)

По-високата твърдост обикновено намалява абразивното износване; в закона на Арчард обемът на износване е обратно пропорционален на твърдостта на по-меката повърхност.

6) Еластични свойства (E , ν) и контактна механика

Модулът на Юнг/Поасоновото число определят контактните напрежения, площ и деформации (Херц); при наличие на адхезия се ползват JKR/DMT разширения.

- 7) Вискозитет на смазката и неговата температурна/скоростна зависимост (реология). Вискозитетът, скоростта и грапавостта определят режима по Стрибек (граничен–смесен–хидродинамичен/ЕХДЛ); силната температурна зависимост на μ е ключова при избор на масло.
- 8) Топлинни свойства (топлопроводност, топлинен капацитет). Те диктуват как се отвежда трибологичната топлина и какви контактни температури се развиват—ниска теплопроводност води до по-високи температури и деградация на материал/смазка.
- 9) Електрични явления (трибоелектричен заряд). Триенето често води до контактно електризиране; получените заряди могат да променят адхезията, триенето и трансфера на материал в диелектрици.

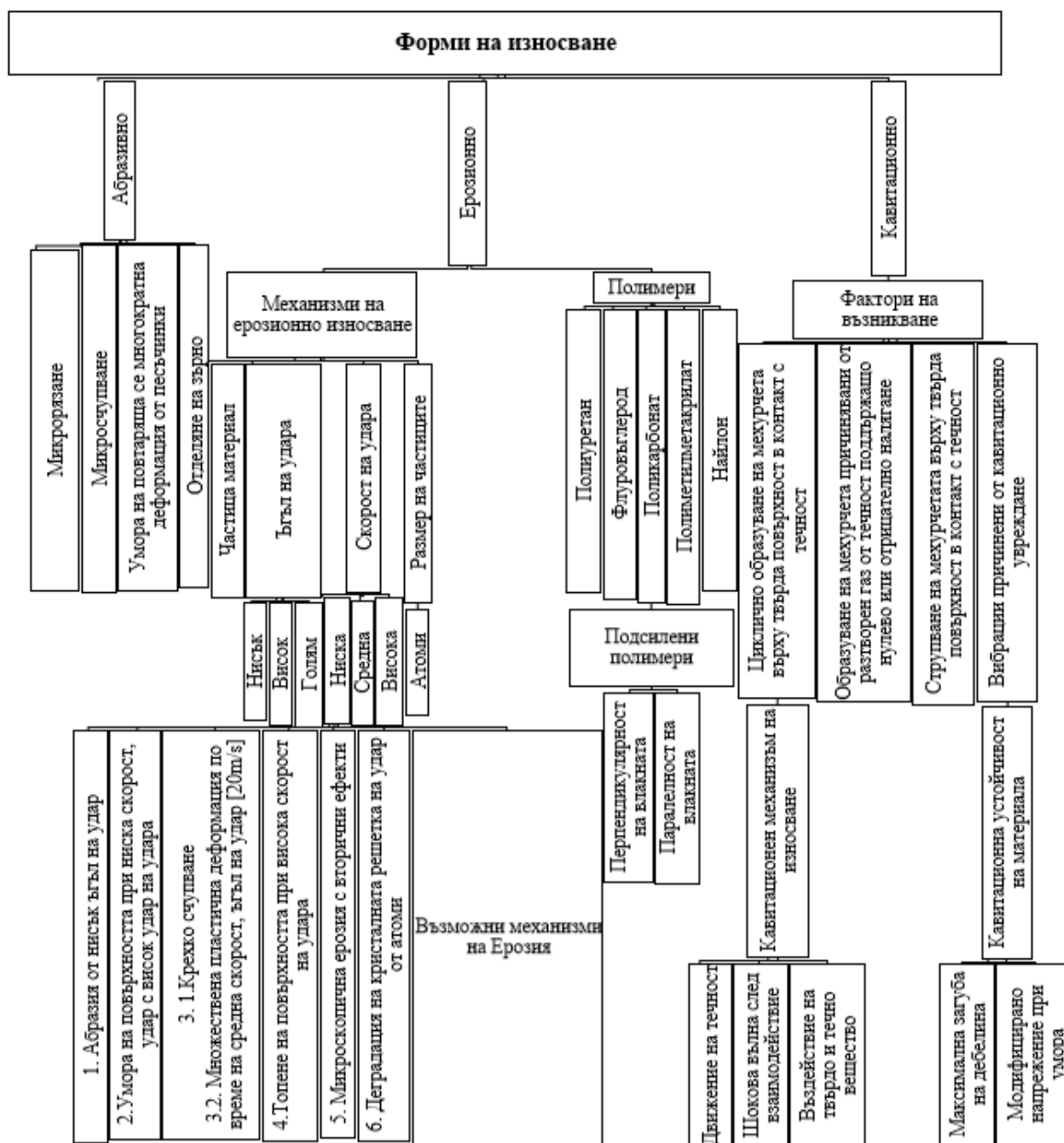
Коефициентът на триене е фундаментален трибологичен параметър, но не е „собствено“ материално свойство (зависи от среда, натоварване, скорост, смазване, грапавост и т.н.). Въпреки това, горните физични свойства до голяма степен го определят.

1.6. Форми на износване

Износването чрез износване и ерозия са форми на износване, причинени от контакт между частица и твърд материал. Абразивното износване е загубата на материал чрез преминаване на твърди частици през повърхност [110]. Ерозивното износване се причинява от въздействието на частици върху твърда повърхност. Кавитация се причинява от локализираното въздействие на течност върху повърхност по време на разпадането на мехурчета.

Абразията и ерозията в частност са бързи и тежки форми на износване и могат да доведат до значителни разходи, ако не е адекватно контролиран.

Въпреки че и трите форми на износване споделят някои общи черти, има и някои основни разлики, например, частица течност може да причиняват ерозия, но не могат да изтъркат. Тези различия се простират до практическото разглеждане на избор на материали за устойчивост на износване поради различните микроскопични механизми на износване възникващи при абразия, ерозия или кавитация [110].



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

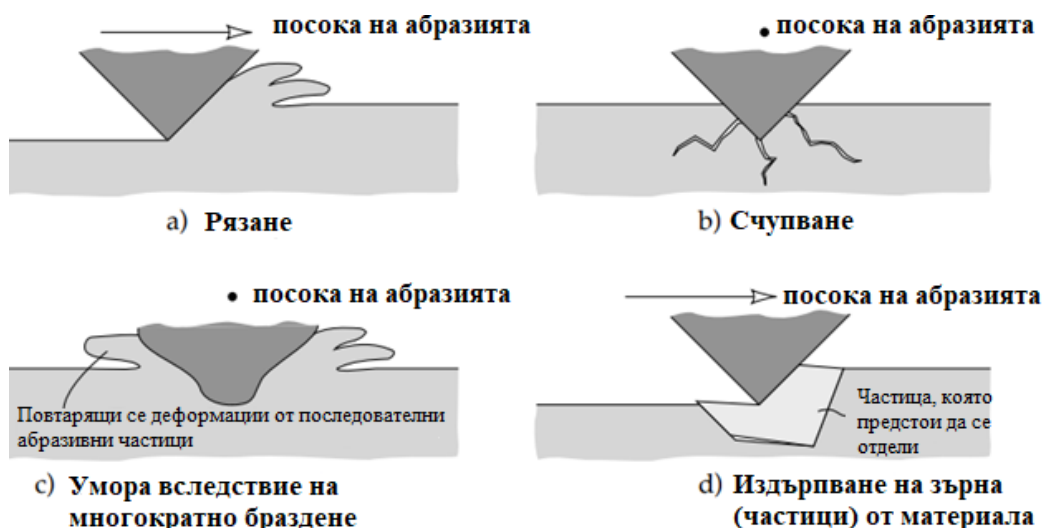
1.6.1. Абразивно износване

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 мек, може да причини абразивно износване, ако твърдите частици са настоящ. 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 [110]. Основна трудност при предотвратяването и контрола на абразивното износване е, че терминът "абразивно

износване" не описва точно съответните механизми за износване. Всъщност има почти винаги няколко различни механизма на износване, действащи съгласувано, всички от които имат различни характеристики. Механизмите на абразивно износване са описани по-долу, последвани от преглед на различните методи за тяхното управление.

Механизми на абразивно износване - Първоначално се смяташе, че абразивното износване от песъчинки или твърди несъвършенства много приличат рязане с поредица от металорежещи машини или пила. Микроскопското изследване обаче разкри, че процесът на рязане се доближава само до най-острите песъчинки и са включени много други по-косвени механизми. Частиците или песъчинките могат да премахнат материала чрез микрорязане, микросчупване, издърпване на отделни зърна или ускорена умора чрез повтарящи се деформации, както е показано на фигурата [110].

Първият механизъм, илюстриран на фиг. 1.20 а), рязане, представлява класическия модел, при който остра песъчинка или твърда треперност реже по-меката повърхност. Материалът, който се реже, се отстранява като остатъци от износване. Когато износеният материал е крехък, например керамика, може да възникне счупване на износената повърхност (фиг. 1.20 б). В този случай остатъците от износване са резултат от конвергенция на пукнатини. Когато пластичен материал се изтърка от тъп пясък, тогава рязането е малко вероятно и износената повърхност многократно се деформира (фиг. 1.20 с). В този случай остатъците от износване са резултат от умора на метала. Проектът последният илюстриран механизъм (фиг. 1.20 d) представлява отделяне на зърно или издърпване на зърно. Този механизъм се прилага главно за керамика, където границата между зърната е относително слаб. При този механизъм цялото зърно се губи като остатъци от износване [110].



Фиг. 1.20. Механизми на абразивно износване: а) микрорязане, б) счупване, в) умора и д) отделяне на зърно.

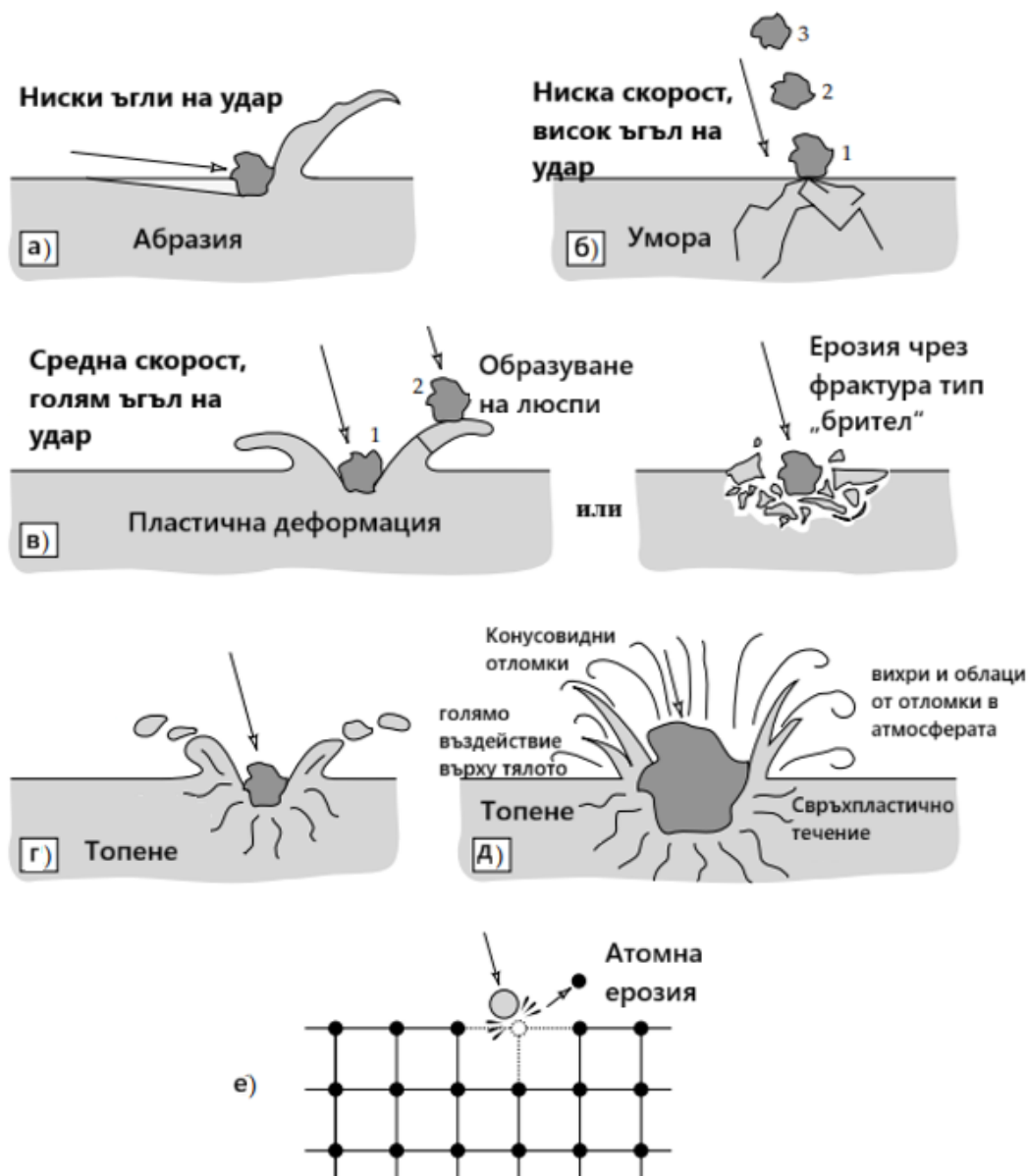
1.6.2. Ерозивно износване

Ерозивното 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 изнosoустойчивост и подробно проучване на материала. Необходими са характеристики за минимизиране на износването. Свойствата на ерозиращата частица също са важни и все повече се разпознават като значим параметър.

1) Механизми на ерозивно износване

Ерозивното износване включва няколко механизма на износване, които до голяма степен се контролират от частицата материал, ъгъл на удар, скорост на удар и размер на частиците. Ако частицата е твърд и твърд, тогава е възможно да възникне процес, подобен на абразивното износване. Когато течните частици са ерозията, абразията не се извършва и механизмите за износване са резултат от повтарящи се натоварвания при удар. Терминът "ерозивно износване" се отнася до неопределен брой механизми на износване, които възникват когато относително малки частици ударят върху механични компоненти. Това определение е емпирични по природа и се отнасят повече до практически съображения, отколкото до някакви фундаментални съображения разбиране на износването. Известните механизми на ерозивно износване са илюстрирани в фиг.1.21.

Ъгълът на сблъсък е ъгълът между ерозираната повърхност и траекторията на частица непосредствено преди удара, както е показано на фиг. 1.21.



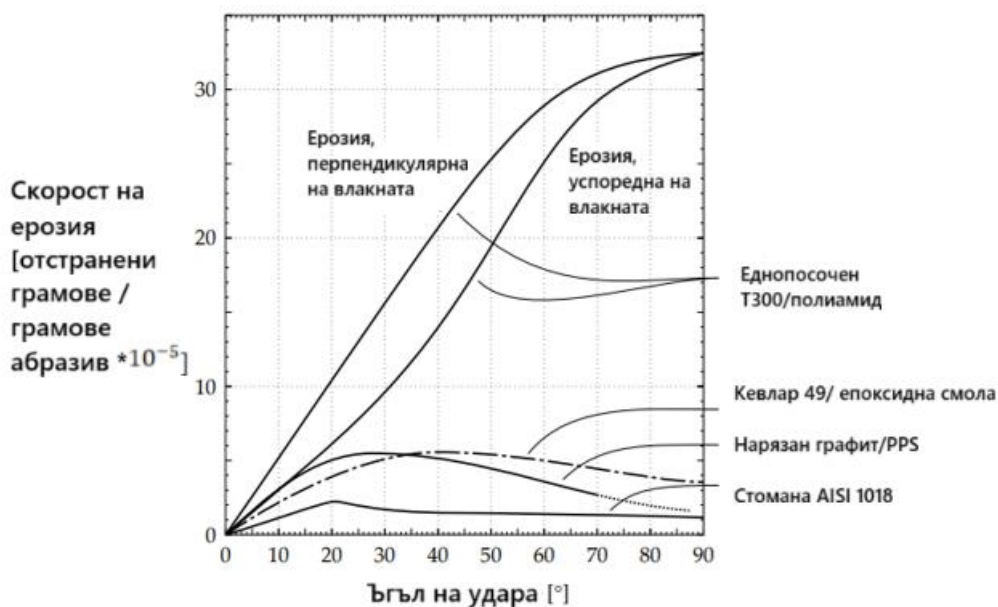
Фиг. 1.21. Възможни механизми на ерозия: а) абразия при ниски ъгли на удар, б) умора на повърхността при удар с ниска скорост и висок ъгъл на удар, в) крехко разрушаване или многократна пластична деформация при удар със средна скорост и голям ъгъл на удар, г) топене на повърхността при високи скорости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

Нисък ъгъл на удар благоприятства процесите на износване, подобни на абразията, тъй като частиците са склонни да се проследяват по износената повърхност след удар. Високият ъгъл на удар причинява механизми за износване, които са типични за ерозията. Скоростта на ерозивната частица има много силен ефект върху процеса на износване. Ако скоростта е много ниска, тогава напреженията при удар са недостатъчни за възникване на пластична деформация и износването протича от повърхностна умора. Когато скоростта се увеличи например до 20 [m/s], е възможно ерозиралият материал да се деформира пластично при удар с частици. В този режим, който е доста често срещан

за много инженерни компоненти, износването може да възникне от повтаряща се пластична деформация. Ако ерозиращите частици са тъпи или сферични, тогава тънки плочи от износен материал образуват се върху износената повърхност в резултат на екстремна пластична деформация.

2) Ерозивна изнosoустойчивост на полимери

Полимерите придобиват все по-голямо значение като ерозионни изнosoустойчиви материали за приложения, при които металите са неподходящи, например когато се изисква прозрачност за видима светлина или друго излъчване. Ерозивната изнosoустойчивост на полимерите обикновено е по-бедна от тази на стоманата. На фиг.1.22. степента на ерозионно износване на подсилени полимери като нарязани графитни влакна в термопласт полифенилен сулфид (PPS), изтъкани арамидни влакна в подсилен епоксиден ламинат (кевлар 49/епоксидна смола), графитни влакна (Т-300) от бисмалеамидна полиамидна смола и въглеродна стомана (AISI 1018) при скорост на удара 31 [m/s] са показани [85].



Фиг. 1.22. Ерозионно износване на подсилени полимери и въглеродна стомана

От фиг. 1.22. се вижда, че полимерите, показващи крехък режим на ерозионно износване характеризира се с висока степен на износване при високи ъгли на удара, значително отстъпва на стоманата. От друга страна, ерозивната изнosoустойчивост на полимерите, ерозиращи в пластичен режим, е сравнима с тази на стоманата. Няма обаче последователна корелация между пластичността и устойчивостта на ерозия за полимерите. Например, найлонът ерозира в пластичен режим, но има лоша ерозионна устойчивост на износване [86]. Класацията на често използваните полимери по отношение на тяхната ерозивна изнosoустойчивост е следната: полиуретан > флуоровъглерод > поликарбонат > полиметилметакрилат > найлон [86,87].

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) Механизъм на кавитационно износване

Характерната особеност на кавитацията е цикличното образуване и срутване на мехурчета върху твърда повърхност в контакт с течност. Образуването на мехурчета се причинява от отделянето на разтворен газ от течността, където той поддържа почти нулево или отрицателно налягане. Отрицателното налягане вероятно ще възникне, когато потокът на течността навлезе в разминаваща се геометрия, т.е. излиза от тръба с малък диаметър към тръба с голям диаметър. Лицето надолу по течението на остър обект, движещ се в течности, например корабно витло, е особено податливо на кавитация. Идеалният метод за предотвратяване на кавитация е да се избягват отрицателни налягания в близост до повърхности, но на практика това обикновено е невъзможно.

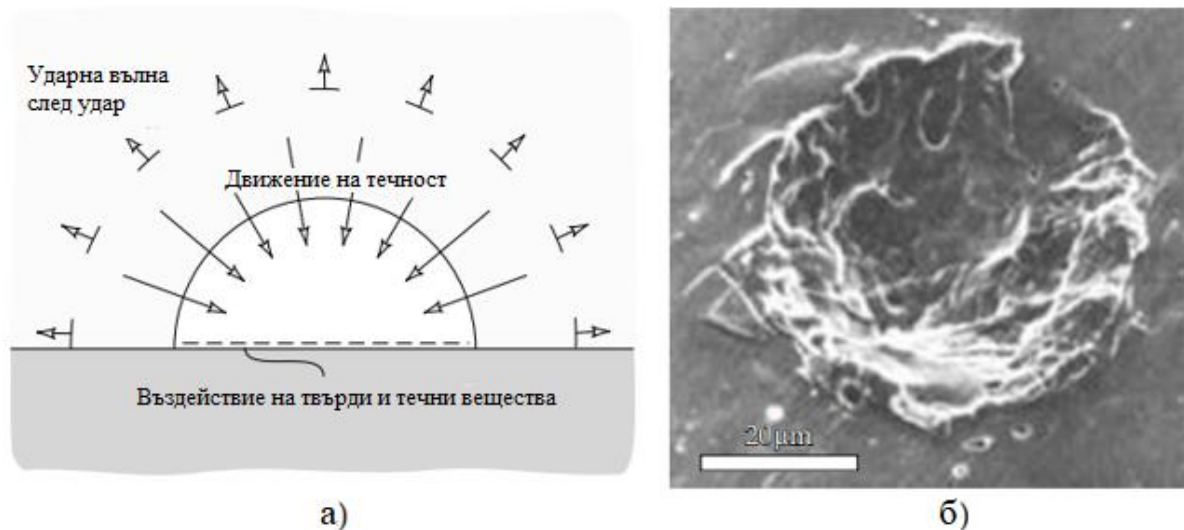
Когато мехурчето се срути на повърхност, течността в близост до мехурчето първо се ускорява и след това рязко се забавя, когато се сблъска с повърхността. Сблъсъкът между течност и твърдото вещество генерира големи напрежения, които могат да повредят твърдото вещество. Преходни налягания до 1.5 [GPa] са възможни. Процесът на колапс на мехурчета, заедно с експерименталните доказателства за дупка, образувана в метална повърхност чрез колапс на мехурчета, са показани на фиг. 1.23 [92].

Кавитационният кратер, показан на фигура 1.23, е създаден на повърхността на индий, който е мек. По-твърдите материали като керамиката е малко вероятно да образуват дълбока дупка под същите условия. Напукването и разпръскването са преобладаващите начини на кавитационно износване за твърди чупливи материали. Почти всички материали претърпяват някакъв вид подповърхностни повреди от кавитация и обикновено се наблюдава натрупване на втвърдяване и образуване на пукнатини [93]. При силна кавитация повърхността може да се превърне в пореста структура, наподобяваща гъба.

Кавитационното износване е по-мек процес в сравнение с ерозията от течности. При него материалът се отделя след милиони цикли на кавитация, докато при ерозия са достатъчни няколко хиляди удара от капчици. Общото е, че и двата процеса имат инкубационен период, но при кавитацията липсва наддаване на тегло, характерно за ерозията [94].

Съществуват и прилики между двата механизма: и при кавитацията, и при ерозията скоростта на повредите следва степенен закон от скоростта на течността. И двата процеса могат да причинят сериозни щети, като изтъняване на стените на тръби в електроцентрали чрез инициране и разрастване на уморни пукнатини, които водят до отделяне на зърната [126].

Кавитационното износване се контролира силно от повърхностното напрежение на течността и неговото намаляване може значително намаляване на степента на износване [118]. Сравнително високото повърхностно напрежение на водата насърчава образуването на големи мехурчета, по-висока енергия на удара по време на колапс на балон и по-малка вероятност голям мехур да се срути в по-малки мехурчета. Когато повърхностното напрежение на водата се намали от 70 на 30 [N/m] чрез добавяне на овлажняващи агенти, кавитационното износване процентът рязко намалява [118].



Фиг.1.23. *Механизъм на кавитационно износване: а) механизъм на колапс на мехурчетата и б) експериментални доказателства за увреждане от кавитация на метална (индиева) повърхност [92].*

Когато се появи кавитация в корозивна среда, корозионното напукване под напрежение може да засили процеса на износване. Пример за това може да се намери в разликата в степента на кавитационно износване между прясна и солена вода [95]. Кавитационното износване може да се ускори чрез едновременното възникване на ерозивно износване, с други думи е възможно синергично взаимодействие между тези два механизма на износване. Ако кавитиращата течност съдържа ерозивни частици, тогава срутващите се мехурчета карат частиците да удрят износената повърхност с висока скорост. Степента на износване е по-висока от кавитацията или ерозията самостоятелно. Например това явление се случва при хидравлични турбини, работещи в пясъчна вода [96].

2) Кавитационна изнosoустойчивост на материалите

Основният фактор при избора на материал за защита срещу кавитационно износване е мащабът на съоръжението, в което се проявява кавитацията. За големи конструкции обикновено се използват различни видове бетон, докато при по-малки е възможно прилагането на покрития от каучук или епоксидни смоли, макар че тяхната ефективност намалява при висока интензивност на кавитацията. Характерно за процеса е, че той атакува най-слабата фаза в материала, например графитните включвания в чугуна или

по-меката матрица около твърдите частици във металокерамиките. Затова материалите с еднородна микроструктура показват по-добра устойчивост [110].

От черните метали най-голяма устойчивост притежават неръждаемите стомани, като особено ефективни са аустенитните Cr-Mn-N и мангановите стомани, известни още като Хадфийлдови. Най-новите аустенитни стомани с високо съдържание на азот комбинират висока якост, пластичност и издръжливост и се отличават с изключително добра устойчивост на кавитационно износване. Чугунът е по-уязвим и за да бъде използван, съдържанието на свободен въглерод и карбиди трябва да се сведе до минимум. Керамичните материали, въпреки високата твърдост, не показват особено добри резултати.

При цветните метали най-слаба устойчивост имат оловните сплави, докато титановите се държат подобно на неръждаемите стомани. Кобалтовите сплави са особено ефективни при тежки условия, тъй като проявяват по-голяма устойчивост на кавитация, отколкото на ерозия. В бронзите важна роля има енергията на подреждане: колкото тя е по-висока, толкова по-ниска е устойчивостта на кавитация.

Кавитационното износване по своя характер е близко до уморното разрушаване, като обикновено материалите с по-ниска уморна якост показват и по-ниска устойчивост. Въпреки това подобряването на уморната устойчивост не винаги води до намаляване на скоростта на кавитационно износване.

1.7. Заключение

От общия преглед и анализ на трибологията като интердисциплинарна наука, става ясно, че нейното значение подчертава критичната роля, която играе в съвременната индустрия и икономика. Фокусът на трибологията върху финансовите и индустриалните ползи осигурява основа за подобряване на производствените процеси, устойчиво използване на ресурсите и намаляване на отрицателното въздействие върху околната среда. Инвестициите в трибологични изследвания и технологии ще продължат да се изплащат многократно, тъй като светът се стреми към по-екологични и рентабилни иновативни решения.

Класификацията на трибологията по основни принципи, приложения, теории, механични свойства, химични взаимодействия на трибоповърхности, физични свойства и явления, разбирайки формите на износване, осигурява важна основа за оптимизиране на производствените системи. Изучаването на силите и коефициентите на триене може да подобри ефективността на много операции в съвременната индустрия, да намали разходите за поддръжка и да разработи иновации, които ще осигурят устойчиво и икономически жизнеспособно бъдеще. В този контекст особено важно значение придобива и изследването на трибологичното поведение на полимери и композити, получени чрез 3D печат, тъй като тези материали предлагат нови възможности за проектиране и производство, но изискват задълбочено разбиране на техните експлоатационни характеристики.

Глава 2.

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.

Методите за определяне на коефициента на триене са фундаментални в трибологията. При тях основната задача е да се измери съотношението между силата на триене и нормалната сила. Най-често се използват директни методи, при които се регистрира тангенциалната сила, а коефициентът се изчислява чрез просто отношение. Индиректните методи използват въртящ момент или енергийни загуби, докато динамичните подходи позволяват да се проследят промените в коефициента при нестационарни режими на работа. В зависимост от условията се прилагат и специализирани методики за сухо триене, смазано триене или триене при високи температури.

Изпитванията на износване обхващат различни механизми на разрушаване. Абразивното износване се изследва чрез контакт с твърди частици или повърхности, при което материалът постепенно се отстранява. Адхезионното износване възниква при директен контакт на метални повърхности и се характеризира с локално заваряване и последващо откъсване на материал. Корозионното износване съчетава химични процеси и механично натоварване, като е особено критично в агресивни среди. Друг характерен механизъм е фретинг износването, при което малки относителни движения и вибрации водят до бързо разрушаване на контактните повърхности. В практиката се използват и ускорени методи, които симулират реални условия за по-кратко време, с цел бърза оценка на експлоатационните свойства.

Методиките за изследване на смазочни материали включват разнообразни подходи. Често се използва четириотков апарат за определяне на граничната носеща способност на масла и гresi. Определят се също вискозитет и реологични характеристики, които са ключови за поведението на смазката при различни температури и натоварвания. Други важни показатели са окислителната стабилност и изпаряемостта, които определят дълготрайността на смазочния материал. Извършват се и изпитвания за антикорозионни и противоизносни свойства, особено при масла с добавки. В последните години все по-голямо значение имат и тестовете за биоразградимост и екологична безопасност.

За да бъдат резултатите съпоставими и надеждни, експерименталните методи се провеждат в съответствие с международни стандарти. Сред тях са ISO 7148 за

трибологични изпитвания, ASTM D4172 за четиритопкови тестове и DIN 50324 за методи на износване. Тези стандарти задават изисквания за условията на изпитване, подготовката на пробите, начините на измерване и оценката на резултатите, което гарантира повторемостта и приложимостта им в индустрията.

Основна роля в трибологичните изследвания играят трибометрите. Устройството „pin-on-disk“ е едно от най-разпространените – при него щифт се притиска върху въртящ се диск и се измерват силите на триене и степента на износване [111]. Системата „block-on-ring“ симулира контакт между плоска и кръгла повърхност и е особено подходяща за оценка на смазочни материали и повърхностни покрития [112]. „Four-ball tester“ е класически апарат, при който три неподвижни сфери се притискат от въртяща се сфера, и служи за определяне на натоварваемостта и противоизносните свойства на масла и добавки [113].

С развитието на технологиите се внедряват и нанотрибометри, позволяващи изследване на триенето и износването на микро- и ниво. Те са особено важни за оценка на тънки филми, защитни покрития и биосъвместими материали. Наред с тях се използват и системи за симулиране на реални работни условия, които позволяват възпроизвеждане на високи температури, вакуум, агресивни среди или циклични натоварвания.

За по-задълбочен анализ на резултатите се използват допълнителни инструменти. Микроскопите – както оптични, така и електронни (SEM) – позволяват изследване на морфологията на износването и идентифициране на механизми на разрушаване. Профилометрите осигуряват измерване на грапавост и топография на повърхността, което е важно за оценка на контактните характеристики. Сензорите за сила, температура и вибрации дават информация за динамичните процеси по време на експеримента, а съвременните системи за регистриране и обработка на данни позволяват автоматизирано събиране, анализ и визуализация на големи масиви от резултати.

Ключова стъпка в трибологичните изследвания е обработката и интерпретацията на данните. Подготовката на пробите е решаваща за постигане на повторемост – необходимо е те да са с точно определена геометрия и контролирана повърхностна обработка. Резултатите се подлагат на статистическа обработка, включваща дисперсионен и регресионен анализ, както и изчисляване на доверителни интервали. Крайните данни се представят под формата на графики и диаграми, които показват зависимостта между натоварване, скорост, температура и коефициент на триене, както и диаграми на износването във времето.

Резултатите от трибологичните изследвания намират широко приложение в индустрията и науката. В машиностроенето се оценяват лагери, плъзгачи двойки и уплътнения. В автомобилната индустрия се изпитват двигателни масла, трансмисионни компоненти и спирачни системи. В енергетиката и авиацията изследванията са насочени към турбинни лопатки, високотемпературни покрития и смазочни материали за екстремни условия. В биомедицината трибологията подпомага разработването на ендопротези, импланти и нови биосъвместими покрития, при които триенето и износването са критични за дългосрочната надеждност.

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

Трибологичните изследвания изучават явленията на триене, износване и смазване между повърхности в относително движение. Тяхната основна цел е да се разбере издръжливостта и работоспособността на материалите и компонентите, което е от съществено значение за оптимизацията на инженерните системи, удължаване на експлоатационния срок и намаляване на разходите за поддръжка. Тези изпитвания се извършват в лабораторни условия с помощта на специализирана апаратура като трибометри и различни изпитвателни установки, позволяващи контрол на натоварванията, скоростите на плъзгане и факторите на околната среда.

1) Основни принципи на трибологичното изпитване

- Измерване на ключови параметри: Определят се коефициентът на триене, степента и вида на износване на повърхността, както и ефективността на смазването.
- Контролирани условия: Пробите се изследват при точно зададени налягания, скорости и температури, които симулират реални експлоатационни сценарии.
- Анализ: Използват се микроскопски и повърхностни техники (например SEM и AFM) за изследване на повърхностните дефекти, износни частици и микроструктурата на материалите.

2) Основни методи за трибологични изследвания

а) Стандартни трибологични тестове:

- Тест на плъзгане – измерва коефициента на триене и износване при определени условия.
- Тест на Астрахан – оценява статичното и динамичното триене между полимер и метал.

б) Методи за измерване на триене и износване:

- Pin-on-Disk (палец–диск): широко използван метод за симулиране на триене чрез ротационно движение между два материала.
- Тест с пружинена система: симулира реални натоварвания при работни условия.

в) Микроскопски и повърхностни анализи:

- SEM (сканираща електронна микроскопия) – визуализация на дефекти и износване.
- AFM (атомно-силова микроскопия) – детайлно изследване на микроструктурата.

г) Измерване на механичните свойства:

- Тест на опън – определя якост и еластичност.
- Шарнирен тест – симулира износване при реалистични движения.

д) Анализи на взаимодействие със смазочни течности:

Изследва се влиянието на различни смазки върху трибологичните свойства на материалите, особено при приложения с високи изисквания за ниско триене и износване.

е) Компютърни модели и симулации:

Чрез молекулярна динамика и методи като крайноелементен анализ (FEA) се предсказват трибологичните характеристики без нужда от физически тестове.

3) Видове трибологични изследвания

Трибологичните изследвания могат да бъдат класифицирани според техния обект и цели:

- Изследвания на триенето: анализират механиката на триене и влияещите фактори като налягане, скорост и температура.
- Изследвания на смазването: оценяват различни смазочни материали и тяхното поведение при различни условия.
- Износване на материали: фокусират се върху видове износване (абразивно, адхезивно и др.) и механизмите зад тях.
- Моделиране и симулации: използват се за прогнозиране на поведението на материалите и оптимизация на дизайна.
- Трибологични тестове: лабораторни изпитвания с методи като тестове на Каплан и Биндер.
- Нанотрибология: изследване на триене и износване на наноразмерни материали, където ключова роля играят атомарните взаимодействия.
- Корабна трибология: фокусирана върху приложения в морската индустрия с предизвикателни условия на работа.
- Инженерни приложения: специфични изследвания за автомобилната, аерокосмическата, електронната и други индустрии.

Комбинацията от експериментални методи, микроскопски анализи и компютърни модели дава цялостна картина за трибологичното поведение на полимерите и композитите. Това подпомага разработването на материали с подобрени експлоатационни характеристики, повишена издръжливост и надеждност в широк спектър от инженерни приложения.

2.2. Устройства за изследване на микротвърдостта на полимерни материали

Твърдостта на пластмаса обикновено се отнася до способността на пластмасовия материал да устои на натискната сила на твърд материал и неговата числена стойност може да се разглежда като количествено отражение на степента на мекота и твърдост на пластмасата. Въпреки че пластмасовата твърдост няма присъщо съответствие с други механични свойства като твърдостта на металните материали, твърдостта е важен показател за контрол на качеството на материала и проверка на продукта.

Общият метод за откриване на твърдост може да бъде разделен на твърдост по Шор и твърдост по Рокуел според формата на детекторната глава. Тъй като тестът за твърдост по Шор е най-широко използван в каучуковата и пластмасовата промишленост.

Твърдостта на материалите е важен механичен параметър, който описва тяхната способност да устоят на деформации при приложение на сила. Съществуват няколко стандартни метода за оценка на твърдостта, всеки от които е подходящ за различни типове материали и приложения. Някои от най-популярните методи включват:

- Метод за измерване на твърдостта по Shore - Използва се главно за нестабилни или еластични материали, като гуми. Метода измерва дълбочината на впечатление, прилагано от определена сила с индикатор.
- Метод по Рокуел (Rockwell)-Използва се широко за оценка на твърдостта на различни метали. Включва два етапа: първо се прилага постоянно натоварване, а след това се добавя допълнително натоварване. Степента на измерване зависи от дълбочината на впечатлението, което се получава.
- Метод по Викерс (Vickers)-Подходящ за оценки на твърдостта на меки и твърди материали. Използва пирамидален индентор, с който се прилага натиск. Измерването на диагоналите на отпечатъка позволява изчисляване на твърдостта с Bickers (HV).
- Метод по Кнуп (Knoop) - Позволява измерване на твърдостта на много тънки материали и покрития. Използва се пирамидален индентор с различно съотношение на страните, което позволява получаване на сравнително малки отпечатъци.
- Метод по Бринел (Brinell) - Използва се за оценка на твърдостта на материали с по-големи зърна, като стомана и чугун. Методът включва прилагане на стоманена или карбидна топка с определен диаметър и сила, след което се измерва диаметърът на отпечатъка.
- Метод по Мос (Mohs)-Този метод е качествен и се основава на сравнителна оценка на твърдостта на минерали. Използва скала от 1 до 10, където "1" е най-мек и "10" е най-твърд.

В зависимост от нуждите и приложенията, различни от горепосочените методи могат да се използват, за да се оцени твърдостта на материалите. Научните и промишлените изследвания често изискват комбинирането на различни методи за постигане на по-точни и надеждни данни.

Съществуващите стандартни методи за оценка на твърдостта на пластмасовите материали са следните [114]:

- ISO 2039-1:2001 — Определя твърдостта на пластмасите, прилагайки метода с вдлъбнатина на топка.
- ISO 2039-2:1987 — Определя твърдостта на пластмасите, като използва Рокуелската скала за твърдост.
- ISO 7619-1:2010 — Определя твърдостта на вдлъбнатините в вулканизирани каучуци и термопластични материали, използваща Шорската скала за твърдост.
- ASTM D785-08(2015) — Определя твърдостта на пластмаси и електроизолационни компоненти, като прилага Рокуелската скала за измерване.
- ASTM D2240-15(2021) — Определя твърдостта на гумените материали, използвайки измервателен уред за твърдост.

Устройствата за изследване на микротвърдостта на полимерни материали се използват за измерване на устойчивостта на повърхността на полимерите срещу локално натоварване от твърд връх, наречен индентор. Те работят на принципа на впечатването и дават информация за твърдостта, еластичността и поведението на материала при малки

натоварвания. Съществуват няколко основни типа устройства, които се прилагат според спецификата на материала и целите на изследването.

Микротвърдомерите от типа Vickers, Кноор или VHN използват пирамидални или ромбоидни индентори и са особено подходящи за много тънки слоеве и твърди полимери. Те позволяват да се измерят диагоналите на отпечатъка чрез микроскоп и дават висока точност на резултатите. Когато е необходимо изключително прецизно изследване, се използват инструменти за наноиндентация. Те работят с изключително малки натоварвания в диапазона от микронютони до милинютони и предоставят данни не само за твърдостта, но и за модула на еластичност на материала. Това ги прави особено подходящи за изследване на тънки покрития, полимерни композити и биоматериали [115, 116, 117].

1) Твърдостта по Шор

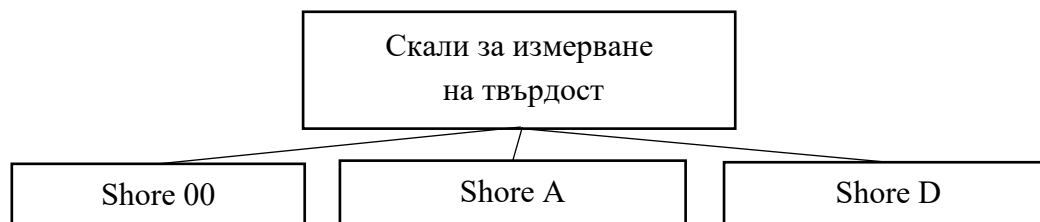
Скалата за твърдост по Шор е изобретена от Алберт Фердинанд Шор около 1920 г. Тази величина е мярката за устойчивостта на даден материал към деформация и проникване. Тя дава информация колко е твърд даден материал и колко сила може да поеме.

Твърдостта по Шор е метод за указване на нивото на твърдост на материала, първоначално предложен от британския Алберт Ф. Шор. Често използвани модели са Shore A, C и D. Общото предназначение на всеки модел е както следва [118]:

- Shore A тип: подходящ за тестване на пластмаси със средна и ниска твърдост, кожа, всички видове каучук, мулти-мазнини, восък и т.н.
- Shore C: Подходящ за тестване на пяна, гъба, микропорести материали за обувки и др.
- Шор D: Подходящ за тестване на твърда гума, твърда смола, стъкло, термопластика, печатни платки, влакна и др.

При определяне на твърдостта по Шор, стандарт ISO, използващ тип A и тип D.

Твърдостта по Шор представлява индикатор за устойчивостта на материала да бъде притиснат в пружинирана игловидна вдлъбнатина. Обикновено твърдостта на полимерите (включително гуми и пластмаси) се оценява с помощта на Шорските скали. Скалата Shore A е предназначена за тестване на меки еластомери (гуми) и други не толкова твърди полимери, докато твърдостта на по-установените еластомери и различни други полимерни материали (термопласти и термореактивни) се измерва със скалата Shore D [119]. Има 3 скали за твърдост по Shore - Shore 00, Shore A и Shore D. (фиг2.1.)



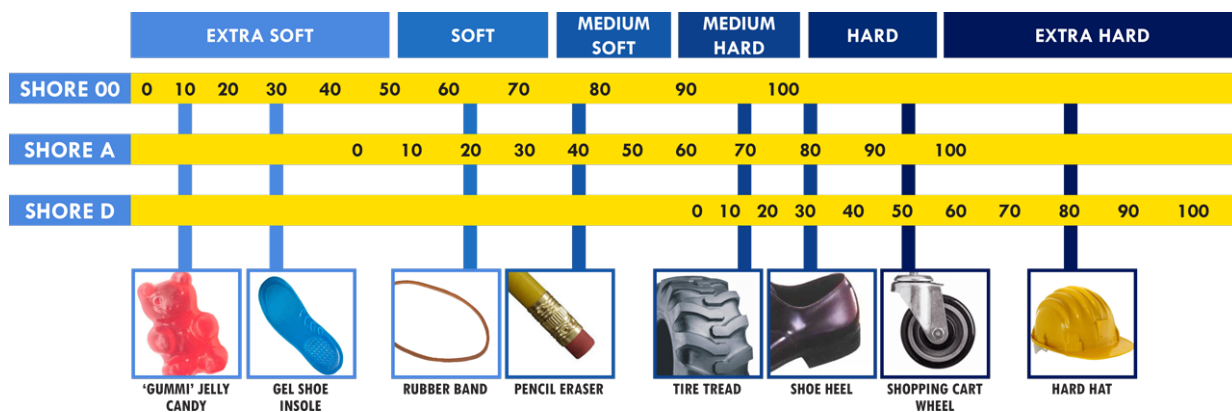
Фиг.2.1. Схема на скали за измерване на твърдост по Шор.

Shore 00 е предназначена за измерване на гуми и гелове, които са изключително меки, например гелови стелки.

Скалата за твърдост Shore A служи за оценка на твърдостта на по-меките и по-гъвкави материали, които варират от много меки и еластични до сравнително твърди с минимална гъвкавост. Полутвърдите пластмаси могат да бъдат измервани в горната част на скалата Shore A с резултати между 90-95A. Shore A е най-широко използваната скала за измерване на твърдост.

Скалата за твърдост Shore D оценява твърдостта на твърда гума, полутвърди и твърди пластмаси, включително тези, които се използват при производството на PVC тръби.

Съществува припокриване между различните скали, както е показано по-долу (Фиг.2.2.); например, материал с твърдост A95 съответства на Shore D50.



Фиг.2.2. Класификация на твърдостта по Шор

За измерване на твърдостта на материал, главно каучук, еластомери и полимери, се използва твърдомер по Шор. В зависимост от скалите, за които се тества даден материал, може да се използва различно притискащо краче. За Shore A се използва по-плоско притискащо краче, а за Shore D се използва по-заострено притискащо краче. Дурометърът на Shore има измервателен уред от 0-100, който използва за записване на показания [120].

Пробата се поставя права и под твърдометъра. Дурометърът се притиска към материала, докато плоската метална плоча се изравни с пробата. По-високият резултат представлява по-висока устойчивост на вдлъбнатина и следователно по-високо число по скалата на твърдостта.

2) Рокуелска скала за измерване на твърдост

Тестът за твърдост по Рокуел е често използван метод за измерване на твърдостта на даден материал. Тестът включва прилагане на специфично натоварване върху индентор, който се притиска в материала, и се измерва дълбочината на получената вдлъбнатина. Този тест се използва широко в контрола на качеството, избора на материал и научноизследователската и развойната дейност и е важен инструмент за определяне на механичните свойства на материала [121].

Скалата на Рокуел включва няколко варианта, подходящи за различни приложения в производството и извън производството на ножове. Скалата на Rockwell C (HRC) и скалата на Rockwell B (HRB) обикновено се използват за оценка на твърдостта на

стомана и други метали, но съществуват други скали за по-меки материали като пластмаси.

3) Методи да измерване на твърдост по Vickers

Тестът за твърдост по Vickers, известен със своята гъвкавост, използва индентор с диамантена пирамида за анализ на широка гама от материали, от меки метали до умерено твърда керамика. Този метод осигурява цялостен анализ на твърдостта на материала чрез числото на твърдост по Викерс (VHN), получено от размера и дълбочината на вдлъбнатината.

Тестът за твърдост на Vickers, който използва диамантен индентор, може да се използва за измерване на твърдостта на широка гама от материали, включително керамика и композити [121].

4) Методи да измерване на твърдост по Кноор

Тестът за твърдост на Кноор, от друга страна, използва диамантен индентор с удължена пирамидална форма, което позволява високо прецизно измерване на твърдостта в много тънки материали или върху повърхности с минимални повреди. Тази прецизност прави теста на Кноор идеален за крехки материали, тънки слоеве или малки компоненти, които може да не издържат на въздействието на други тестове. Измерванията по Кноор, изразени като число на твърдост по Кноор (KHN), са от решаващо значение за избора на подходящи материали в деликатни или изискващи прецизност приложения [121].

Тестът за твърдост на Кноор, който използва пирамидален индентор, се използва за измерване на твърдостта на тънки покрития и повърхностни слоеве.

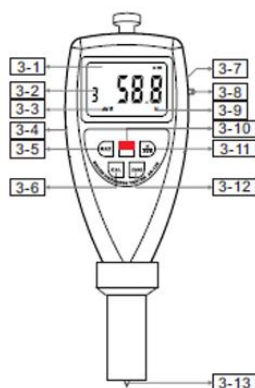
По-широко разпространени в практиката са портативните твърдомери, например тези, които измерват по скалите Shore A или Shore D. Те се използват най-често при полимери и гуми и работят със стандартен пружинен механизъм и връх със специфична форма. Макар че техните измервания са по-бързи и по-лесни за изпълнение, те се отличават с по-ниска точност в сравнение с лабораторните микротвърдомери. Съществуват и динамични твърдомери, които използват падащ или вибриращ индентор. Те се прилагат основно за контрол на качеството и за сравнителни изпитвания, когато е необходимо бързо да се оцени твърдостта на материалите.

Тези устройства намират широко приложение в различни области. Те се използват за изследване на твърдостта на тънки полимерни покрития, за контрол на качеството на пластмаси, гуми и композити, както и за характеризиране на биополимери и медицински материали. Освен това дават възможност за анализ на промените в структурата на полимерите, настъпващи след процеси като стареене, UV облъчване или термична обработка.

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

- Instruction Manual Digital Shore Hardness Tester SAUTER HD

Дигиталният уред за измерване на твърдост по Shore SAUTER HD е прецизен електронен измервателен инструмент, предназначен за определяне на повърхностната твърдост на еластомери, гуми, пластмаси, меки полимери и други нетвърди материали. Уредът измерва дълбочината на проникване на индентор (сонда) в материала при точно определена сила, като резултатът се преобразува и показва на цифров дисплей в единици Shore (A или D, в зависимост от 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).

На фиг. 2.3. е изложен уредът SAUTER HD, който представлява прецизен дигитален дюрометър, предназначен за измерване на твърдостта на еластомери и пластмаси по стандартните скали Shore A и Shore D. Неговата конструкция комбинира механична точност с модерна електроника, което го прави надежден и удобен инструмент за лабораторни и производствени измервания. Основната част на уреда е корпусът с дигитален дисплей, който показва моментни или максимални измервателни стойности в реално време. Дисплеят включва различни индикатори – за режим „MAX“, за осредняване на резултатите („AVE/N“), за състоянието на батерията и други полезни функции, които улесняват оператора по време на работа [122].

В предната част на уреда е разположен инденторът (сондата) – прецизен метален връх, който се въвежда в материала по време на измерването. Формата и размерът му са изцяло съобразени със стандартите за Shore A или Shore D, което гарантира съвместимост с международните методики за изпитване. Около сондата се намира притискащата основа (presser foot), която осигурява равномерен и стабилен контакт с повърхността на пробата. Нейният дизайн е такъв, че позволява точно позициониране на уреда и минимизира грешките, свързани с неправилен наклон или неравности по повърхността.

Уредът се управлява лесно чрез няколко функционални бутона. Power служи за включване и изключване, MAX активира или деактивира режима за отчитане на максималната стойност, Zero занулява показанието, N/AVE позволява настройване на броя измервания, използвани за изчисляване на средна стойност, а CAL стартира

процедурата за висококрайна калибрация. Батерийният отсек е разположен на задната част на корпуса, което осигурява бърз и лесен достъп при необходимост от смяна на батериите.

От функционална гледна точка, SAUTER HD предлага цифрово отчитане с висока разделителна способност и лесна четимост, автоматично запаметяване на максималната стойност, възможност за изчисляване на средна стойност от 1 до 9 последователни измервания и вградени функции за калибриране – както нулева, така и висококрайна. Уредът има индикация за състоянието на батерията и функция за автоматично изключване при неактивност, което удължава живота на захранването.

Благодарение на тези характеристики, уредът намира широко приложение в различни индустрии и лаборатории. Използва се в производството и контрола на качеството на гумени изделия, в пластмасовата и автомобилната индустрия, в лаборатории за изпитване на материали, както и в научноизследователската и развойна дейност. Сред основните му предимства са високата точност и повтаряемост на резултатите, лесната работа чрез интуитивно меню и бутони, компактният и лек дизайн, който го прави удобен за пренос, както и съвместимостта му с международните стандарти за измерване по Shore.

Неговата конструкция и функционалност го правят подходящ както за бързи проверки на място, така и за прецизни лабораторни анализи.

- 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 [123]

Управлението и отчетът на резултатите се извършват чрез 8-инчов тъчскрийн интерфейс, а оптичната система включва микроскоп с няколко обективни лещи (2.5X, 5X, с възможност за 10X и 20X) и окуляр 15X, предоставящи общи увеличения до 75X. Това позволява измерване на отпечатъците с минимална разделителна единица 0.1 μm . Уредът съответства на международните стандарти ISO 6508, ASTM E-18, ISO 6506, ASTM E10, ISO 6507 и ASTM E92, което гарантира надеждни и стандартизирани резултати в широк диапазон: 8–650 HBW, 20–100 HR, 8–2900 HV.

- **Olympus BX53M** - За микроструктурни наблюдения е използван металографски микроскоп Olympus BX53M, изобразен на фиг.2.5, изграден върху високопроизводителната UIS2 безкрайно коригирана оптична система, осигуряваща изключителна яснота и разделителна способност на изображението при различни увеличения. Уредът е снабден с усъвършенствано LED осветление за отразена, а в някои конфигурации и за преминала светлина, което гарантира стабилен и интензивен светлинен поток.

Микроскопът поддържа разнообразни методи на наблюдение: Brightfield, Darkfield, DIC (Диференциално интерференчен контраст), Поляризирана светлина и MIX метод, позволяващи детайлен анализ на различни материални свойства. Съвместим е с широк набор от обективи на Olympus (5x, 10x, 20x, 50x, 100x), които в комбинация със стандартни окуляри 10x осигуряват широк диапазон от увеличения. Прецизното фокусиране се постига чрез коаксиален механизъм за грубо и фино регулиране с ход 25 mm и минимална стъпка 1 μm . Механичната платформа е с висока точност и възпроизводимост при позициониране на пробите, а въртящата глава побира между 5 и 7 обектива (с възможност за кодирани варианти). Тринокулярната глава позволява удобна ергономична работа и директна интеграция с цифрови системи.

Към микроскопа е интегрирана **цифрова камера Olympus DP23**, изобразен на фиг.2.6, базирана на цветен CMOS сензор с резолюция 6.4 MP (3088 $\times$ 2076 пиксела, размер на пиксела 2.4 $\times$ 2.4 μm). Камерата се свързва чрез USB 3.1 Gen1, осигуряваща бърз трансфер и предаване на живо при до 60 fps при Full HD и до 45 fps при пълна резолюция. Поддържа 10-битов аналогово-цифров преобразувател за разширен динамичен диапазон, разширено зрително поле (до FN25 при използване на подходящи адаптери и оптика) и режим с висок контраст за трудни проби.



Фиг.2.5 Металографски микроскоп
Olympus BX53M



Фиг.2.6 Цифрова камера *Olympus DP23*

Камерата се монтира чрез C-mount на тринокулярния порт, което я превръща в надежден инструмент за документиране и анализ на изображенията, получени с напредналата оптична система на BX53M.

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 [124].



Фиг.2.7 Високоскоростна камера NAC MEMRECAM HX6

Камерата разполага с вътрешна бърза памет 32 GB, CMOS sensor с резолюция до 2560x1920 pixels при 1 000 fps, външна синхронизация, 3 различни обектива (вкл. варио обектив), температурна калибровка, допълнително осветление от два прожектора по 1 KW, управляващ софтуер и софтуер с възможност за измерване на позиция, скорост, ускорение и ъглови параметри. Може да работи с различни програмни продукти, разполага с дистанционно управление, с възможност за playback от самата камера, USB и Ethernet интерфейси.

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

3D принтирането е сред най-бързо развиващите се индустрии в световен мащаб. То позволява създаването на разнообразни обекти – от играчки и аксесоари до автомобилни части, спортни изделия и дори биологични структури. Благодарение на широките си възможности технологията има значим принос за развитието на индустрията, медицината и творческите дейности. Поради това е важно да се познават различните видове технологии на печат, използваните материали и техните характеристики.

Принтирането, или иначе казано адитивното производство, представлява процес на създаване на триизмерни твърди обекти чрез цифров модел. Преди изграждането на самия обект, той преминава през серия от адитивни стъпки, при които материалът се отлага слой по слой. Повечето адитивни технологии работят по сходен принцип, като дебелината на отделните слоеве обикновено варира между 16 и 180 микрона, в зависимост от предназначението на обекта и изискванията за точност. Използването на 3D принтиране за производство на единични части, прототипиране или за създаване на отливки води до значително намаляване на разходите и времето за производство. Адитивната технология елиминира редица традиционни операции, които са времево и ресурсно интензивни – като струговане, фрезование, леене и други.

Основните параметри, които определят качеството и свойствата на отпечатания обект, включват дебелината на слоя, ъгъла на запълване, шаблона за запълване и ориентацията на материала по време на печат. Управлението на тези параметри позволява оптимизация на здравината, точността и външния вид на крайния продукт, което прави 3D принтирането изключително гъвкава и мощна технология за съвременното производство. Дебелината на слоя за отлагане на материала, ъгълът на запълване, шаблонът за запълване и ориентацията на отлагането са основни параметри за печат [125.126].

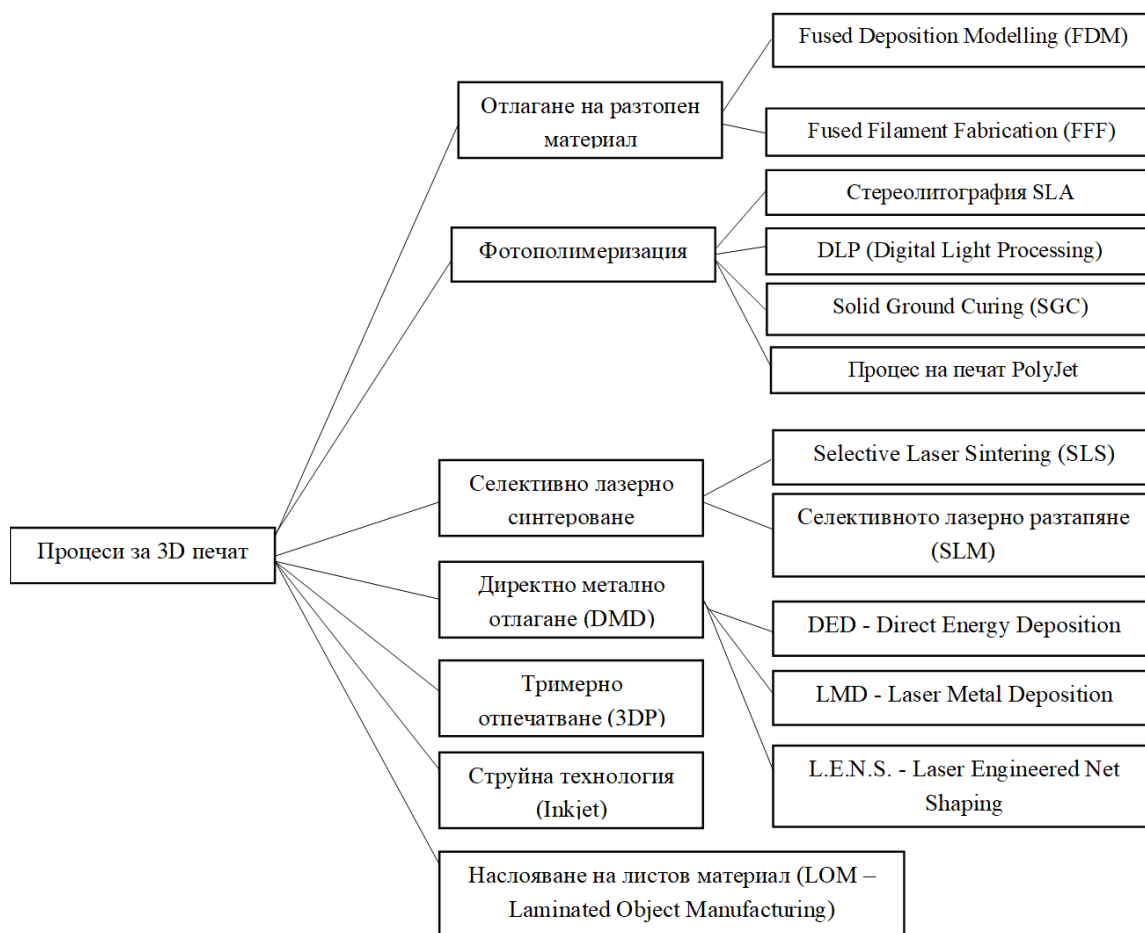
Трите най-утвърдени процеса на пластмасов 3D печат днес са следните:

1. Fused Deposition Modelling (FDM) - 3D принтерите за моделиране на отлагане, или още познати като Fused Deposition Modelling (FDM) се топят и екструдират термопластични нишки, които дюзата на принтера отлага слой по слой в областта на изграждане.

2. Стереолитографията (SLA) 3D принтерите използват лазер за втвърдяване на термореактивни течни смоли в втвърдена пластмаса в процес, наречен фотополимеризация.

3. Селективното лазерно синтероване (SLS) 3D принтерите използват мощен лазер за сливане на малки частици термопластичен прах.

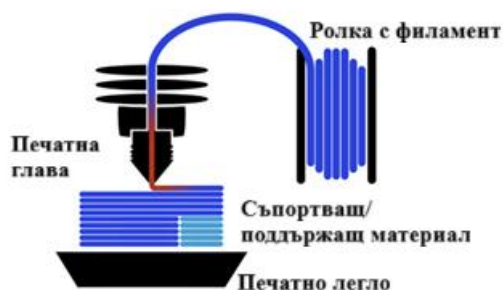
Видовете процеси за създаване на 3D принтирани детайли са разгледани в дълбочина, обърнато е внимание на различни технологии и техните разновидности. Процесите са представени схематично на Фиг.2.8.



Фиг.2.8. Схема на процесите за 3D печат

2.4.1. Отлагане на разтопен материал (FDM или FFF)

3D принтерите за моделиране на отлагане, или още познати като Fused Deposition Modelling (FDM) се топят и екструдират термопластични нишки, които дюзата на принтера отлага слой по слой в областта на изграждане [125.127]. На фиг.2.9 е илюстрирана технологията на печат на 3D принтерите, работещи по този принцип.



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

2.4.2. Фотополимеризация - Стереолитография (SLA) и процес на печат PolyJet

Стереолитографията (SLA) - Стереолитографията (SLA) е високоточна технология за 3D печат, при която лазер втвърдява течна фотополимерна смола слой по слой чрез процес, наречен фотополимеризация. SLA използва източник на светлина с определена дължина на вълната, обикновено в ултравиолетовия спектър, за селективно втвърдяване на повърхност на смола във ваната на принтера. 3D моделът се проектира чрез CAD софтуер и се преобразува във файлов формат, подходящ за принтера, като STL или OBJ. Смолата съдържа мономери или олигомери, разтворители, фотоинициатори и добавки, които осигуряват специфични функционалности. Фотоинициаторите поглъщат UV светлина, което генерира свободни радикали, стартиращи фотополимеризацията и формиращи омрежена структура, слой по слой [126, 127].

Типичната дебелина на слоя при SLA печат е около 100 μm , а времето за втвърдяване на слой варира от 3 до 15 секунди. След отпечатване обектът се почиства с разтворител, като изопропилов алкохол, и може да се подложи на допълнително UV втвърдяване за достигане на пълна механична стабилност [128]. SLA намира приложение в медицината, включително създаване на анатомични модели, хирургически водачи и персонализирани импланти, както и в тъканното инженерство за изграждане на сложни структури като съдови мрежи за регенерация на тъкани. В индустриален контекст SLA се използва за производство на прототипи и крайни части с висока прецизност [129,130].

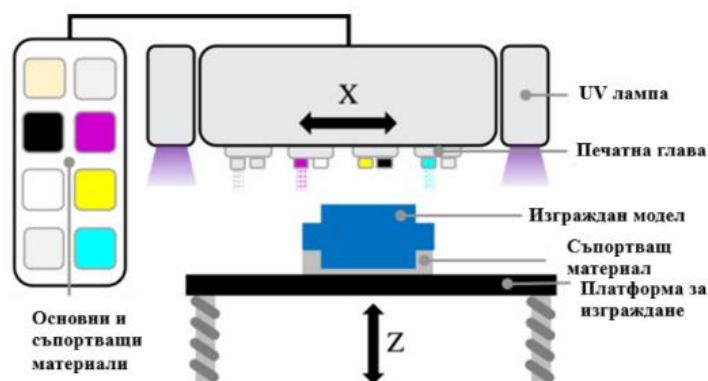
Въпреки своите предимства, традиционните SLA смоли, базирани на епоксиди или акрилати, имат няколко ограничения. Те произхождат от изкопаеми ресурси и имат относително голям въглероден отпечатък. Освен това фотополимеризацията води до обемно свиване и донякъде крехки отпечатани части. Термо-реактивната природа на тези материали не позволява тяхното рециклиране или биологично разграждане, което създава проблеми с управлението на отпадъците. Това налага търсенето на по-устойчиви алтернативи като биоразградими смоли и композити [129, 128.131].

Процес на печат PolyJet - PolyJet 3D печатът е фотовтвърдяващ се полимерен AM процес, известен със своята висока разделителна способност и точност, както и възможност за работа с много материали [132]. Технологията произвежда гладки, точни части, прототипи и инструменти. С микроскопична разделителна способност на слоя и точност до 0,014 mm, той може да произвежда тънки стени и сложни геометрии, използвайки най-широката гама от материали, налични с всяка технология.

Предимства на PolyJet:

- Създава гладки, детайлни прототипи, които предават естетиката на крайния продукт.
- Произвеждат точни форми, приспособления, приспособления и други производствени инструменти.
- Постигат се сложни форми, сложни детайли и деликатни черти.
- Включва най-голямото разнообразие от цветове и материали в един модел за ненадмината ефективност.

Въпреки че технически не е отделна категория 3D печат, PolyJet има няколко уникални характеристики, които го отличават от другите процеси. Най-отличителният, разбира се, е широкият избор от цветове. Но PolyJet не е предпочитан само заради разнообразието от цветове, технологията се използва за здрави индустриални части, биосъвместими дентални продукти, производствени инструменти, медицински модели, протези, хирургически водачи и много други. Фигура 2.10 схематично илюстрира 3D печат PolyJet.



Фиг. 2.10. Илюстрация на 3D печат PolyJet

Печатащите глави се движат в двете посоки X и Y и избиращателно изпръскват материали според дизайна на обекта. Осите X и Z са показани на фиг. 2.10 и оста Y е перпендикулярна на равнината XZ. След като всеки слой се отпечата и втвърди от UV лампи, прикрепени към двете страни на печатащите глави, платформата за изграждане се спуска на разстояние, равно на дебелината на един слой, и се отлага следващият слой материали. Тези стъпки се повтарят, докато обектът бъде завършен. Има два вида покритие на повърхността (тип покритие): гланц и мат. Когато е избран тип лъскаво покритие, поддържащият материал покрива само долните повърхности (както и повърхностите на надвесите) на отпечатания обект. Когато е избран тип матово покритие, поддържащият материал покрива всички повърхности на отпечатания обект.

PolyJet теоретично може да произведе пълната цветова гама. Той поставя множество материали за основен модел (напр. циан и жълто) близо един до друг, за да направи всеки цвят, различен от цветовете на материалите за основен модел. За да отпечатат пълноцветно, потребителите могат да определят цвета на отпечатан обект, като използват цветовата система RGB в софтуера на принтера [133].

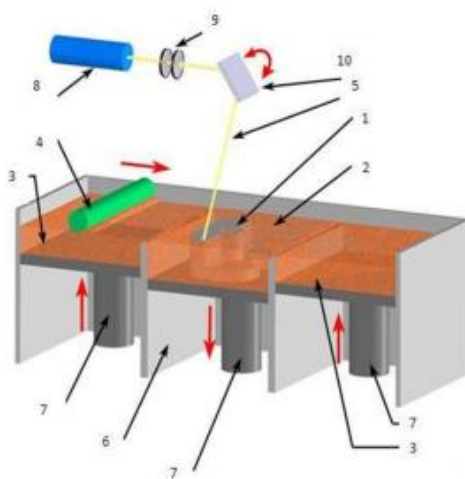
2.4.3. Селективно лазерни процеси

Селективното лазерно синтероване (SLS) е метод за 3D печат, при който високопроизводителен лазер синтерова прахообразни материали, обикновено полимери като nylon, слой по слой, за изграждане на солидна структура на базата на 3D модел [132]. Процесът започва с разпръскване на тънък слой прах върху нагрятата платформа, след което лазерът синтерова избраните области според нарязания модел. Този процес

се повтаря слой по слой, докато целият обект се формира в прахообразната среда, която го поддържа през целия процес на печат [135.136].

SLS принадлежи към категорията Powder Bed Fusion (PBF), при която лазерът синтерова прахообразни материали, включително полимери и метали, за създаване на триизмерни обекти [136]. Технологията е разработена през 1980-те години от Д-р Карл Декард и Д-р Джоузеф Биман в Тексаския университет в Остин под спонсорството на DARPA [137]. Основни предимства на SLS включват възможността за производство на сложни геометрии без нужда от допълнителни опори и създаването на функционални части с висока точност. Въпреки това, процесът може да предизвика термично напрежение и свиване на материала, което влияе на точността и качеството на крайния продукт [138].

На Фигура 2.11 се представя общият вид на технологичния процес при селективното лазерно синтероване. 1 - Изграждан модел; 2 - Прахообразен материал; 3 - Бункери за захранване 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

Процесът на селективно лазерно синтероване включва последователното сканиране на всеки слой с лазер. След синтероването на всеки слой, буталото се спуска на разстояние, равно на височината на слоя. С помощта на валяка се нанася нов слой свеж прах върху вече синтерования слой, който започва да изстива. Този нов слой се уплътнява. Този процес се повтаря до завършване на изграждането на модела.

През процеса несинтерованият прах служи като поддържащ материал. След завършването на изграждането, създаденият детайл и свободният прах се оставят да изстинат през няколко часа. За равномерно охлаждане след създаване на последния слой върху детайла се нанася слой свеж прах.

След цялостно охлаждане детайлът се изважда внимателно и се почиства. Несинтерованият прах се рециклира и използва за изработката на следващ модел .

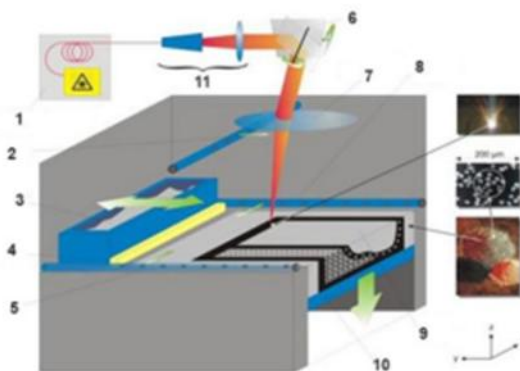
Селективно лазерно разтопяване (SLM) - Селективното лазерно разтапяне (SLM) е технология за адитивно производство, сходна със селективното лазерно синтероване (SLS), но за разлика от него процесът включва пълно разтапяне на металния прах чрез високоенергиен лазер. Това позволява създаването на детайли с почти 100% плътност и

подобрани механични свойства, сравними с тези на обработените по конвенционални методи материали [139, 140].

SLM се използва основно за метали като титан, алуминий, кобалт-хром и неръждаема стомана, което го прави особено подходящ за приложения в аерокосмическата, медицинската и автомобилната индустрия [141]. Процесът е известен и под името Direct Metal Laser Sintering (DMLS) и е разработен през 1995 г. във Fraunhofer Institute for Laser Technology (ILT) в Аахен, Германия [142].

Управлението на параметри като мощност на лазера, скорост на сканиране и дебелина на слоя е критично за минимизиране на вътрешни напрежения, поръзност и за постигане на висока точност на размерите. Въпреки техническата си сложност, SLM е сред най-обещаващите методи за производство на високофункционални метални компоненти [143]. За да се оптимизира точността на изделиято, се избират правилната плътност и интензитет на лазерния лъч, в зависимост от използвания прахообразен материал. Също така, важни параметри включват дебелината на изграждания слой, която съответства на диаметъра на зърната в материала, скоростта и времето на сканиране с лазера, както и скоростта на топене на материала.

На фиг. 2.12 е представен общия вид на технологичния процес при SLM. Първоначално валикът (4) разпределя равномерно слой прахообразен материал (2) върху работната маса на бункера (6). Дебелината му е равна на дебелината на един слой от изграждания модел (1). След това лазерният лъч (5) разтопява сечението на изграждания обект в равнината XY чрез отражение в огледало (10). Когато отпечатването на първото напречно сечение приключи, работната маса на бункера (6) се премества надолу на стъпка, равна на дебелината на един слой.



Фиг.2.12 Общ вид на технологичния процес при SLM

Разликите между SLS (селективното лазерно синтероване) и SLM (селективното лазерно разтапяне) са следните:

- Прах: SLS използва по-малко плътни полимерни прахове, докато SLM използва метални прахове.
- Процес: SLS синтерова (забелязва се частичен метод за съединение на частиците), докато SLM разтапя праха напълно, което води до по-висококачествени части с по-добри механични свойства.

- Приложения: SLS е по-често използван за производството на прототипи и функционални части от пластмаса, докато SLM е предпочитан при производството на метални части с висока якост.

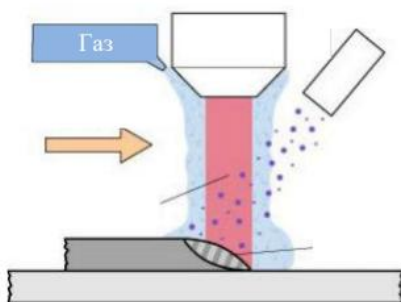
И двете технологии предлагат уникални предимства и недостатъци и се използват в различни индустриални приложения.

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 [142]. Тази техника обхваща няколко разновидности, обединени под термина Direct Energy Deposition (DED), като Laser Metal Deposition (LMD), Laser Engineered Net Shaping (LENS) и други [143].

Основният принцип включва едновременно подаване на материал и енергия върху повърхността, което позволява слоево отлагане и изграждане на сложни метални геометрии. За разлика от SLM и SLS, където процесът протича в прахово легло, при DED материалът се доставя целенасочено в зоната на стопяване. Това прави технологията особено подходяща за ремонт и модификация на съществуващи части, както и за изграждане на големи елементи с висока производителност [142].

В българската практика често се използва терминът „лазерно наваряване“, за да се опише този процес, особено когато става дума за възстановяване на износени машинни елементи. DED/DMD намира приложение в аерокосмическата, енергийната и тежката индустрия, където се ценят възможностите за бърз ремонт, удължаване на експлоатационния живот на компонентите и производството на функционални прототипи [146]. На фиг.2.13 е представен общия вид на технологичния процес при DMD.



Фиг. 2.13 Общ вид на технологичния процес при DMD

При директното метално отлагане се използват три основни вида топлинни източници:

- Системи с лазерен източник - Тези системи са най-разпространени, тъй като позволяват прецизно насочване на енергията в много малка област (части от милиметър). В случай на лазерни източници, за да се предотврати окисляване, се внася защитен газ. Този процес не изисква използването на вакуумна камера.
- Електронно-лъчеви системи - Тези системи се използват по-рядко и позволяват фокусиране в област с по-малки размери дори в сравнение с лазерните системи.

Заради бързото затихване на електронния лъч във въздушна среда, процесът се извършва под вакуум.

- Плазмени системи - Плазмените системи постигат по-висока производителност от електронно-лъчевите и лазерните системи. Въпреки че високата производителност и по-големите размери на обработваното петно могат да доведат до намалена точност и груба повърхност.

DMD системите позволяват изработването на детайли със сложна форма от различни видове метал, като стомани, алуминий, титаний, никелови сплави и др. В някои случаи DMD системите се комбинират с механична обработка за отнемане на материал, за да се избегнат грешки от пребазиране на детайлите по време на последващите операции. Тези комбинирани системи се наричат хибридни . Пример за успешна хибридна система е LASERTEC 65 DED Hybrid на германската компания DMG Mori, която позволява изработването на детайли с маса до 600 kg и размери 735x650x550 mm. Тази система позволява създаване на детайли и покрития чрез добавяне на материал и последваща 5-осна обработка с отнемане на материал.

Процесът комбинира елементи от 3D печат и лазерна обработка, предоставяйки нови възможности за производството на детайли с сложна геометрия и висока механична якост. Основните стъпки в процеса на DMD са:

1. Подготовка на 3D модел - Създава се CAD модел на детайла, който ще бъде изработен. Моделът може да бъде оптимизиран за адитивно производство.
2. Слизеринг - Моделът се обработва чрез софтуер за слайсинг, който генерира G-код за контрол на работния процес на DMD машината.
3. Нанасяне на метален прах - DMD системата използва атмосфера от инертен газ (обикновено аргон), за да предотврати окисляване на материала по време на процеса. Металният прах (например неръждаема стомана, титанови сплави или други метали) се подава чрез инжектор или дюза, където е предварително разположен.
4. Лазерно разтапяне - Лазерът се активира и разтапя металния прах в точките, където е необходимо, образувайки тънък слой от разтопен метал. Лазерът поема контрол върху температурата и скоростта на обработка, осигурявайки необходимата адхезия между слоевете.
5. Изграждане на слоя - След нанасяне на един слой, системата нанася следващ слой от метален прах, а лазерът продължава да разтапя новия материал. Този процес продължава до завършване на целия детайл, който може да бъде с много сложни геометрии.
6. Пост-обработка - След завършване на печата, детайлът може да премине през пост-обработващи операции, като термична обработка, шлайфане или боядисване, за да се постигнат желаните механични свойства и завършен вид.

DMD (Директно метално отлагане) намира приложение в различни индустрии, включително ремонт на детайли, където е особено ефективен за възстановяване на износени компоненти чрез добавяне на нов материал на повредените места. Технологиата позволява също производство на сложни и персонализирани части, които биха били трудни за изработка с традиционни методи, както и бързо прототипиране на

метални компоненти. DMD предлага значителни предимства, като способността да работи с разнообразни метални материали, възможността за бързо производство на сложни форми и спестяване на материали, тъй като добавя материал само там, където е необходимо, което я прави иновативен инструмент за производство и ремонт на метални компоненти.

2.4.5. Тримерно отпечатване (3DP)

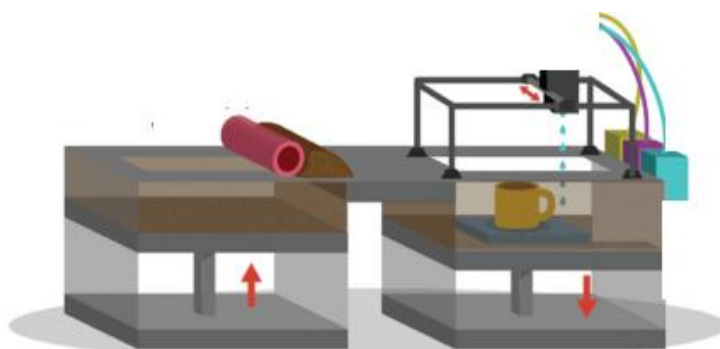
Триизмерното отпечатване (3DP) е адитивна производствена технология, разработена в Масачузетския технологичен институт (MIT) в САЩ през началото на 90-те години [147]. Методът се основава на принципа на инжекционно свързване, при който върху слоеве от прахообразен материал се впръсква свързващ агент 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 [148].

Процесът протича в платформа, пълна с прахообразен материал, като всеки слой от модела се изгражда върху предходния. След отпечатване на слой платформата се спуска, нанася се нов прах и цикълът се повтаря. Несвързаният материал действа като естествена поддържаща структура, което елиминира нуждата от допълнителни опори [149].

3DP позволява производството на обекти с произволна геометрия, включително сложни кухи структури и детайли, трудни за изработка чрез класически методи. След приключване на печата детайлът се изважда, почиства от праха и често се подлага на термична обработка (изпичане) за подобряване на механичните му свойства [150]. Технологията намира приложение в бързото прототипиране, керамиката, полимерите и биомедицинските изделия, като дава възможност за висока ефективност и точност при изработката [146].

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 пещ. 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

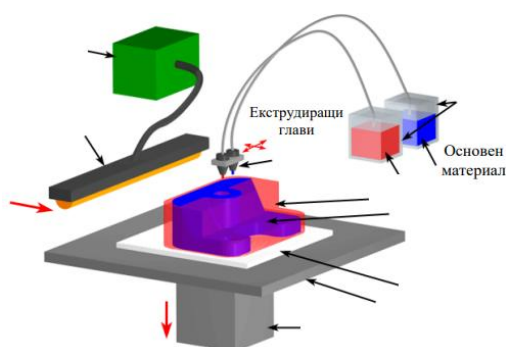
2.4.6. Струйна технология (Inkjet)

При този метод се използва екструдиреща глава с две дюзи: една за основния материал и една за поддържащия материал [151].

Основният материал, който често е восъкоподобен полимер, се подава към дюзата и се подгрява до течно състояние. Той се впръсква върху подложката под формата на фини капчици, които мигновено се втвърдяват.

Поддържащият материал също се нанася под формата на капчици. Този процес образува твърд слой от основния и поддържащия материал, който след това се фрезува от специална фрезова глава на машината до достигане на желаната дебелина.

След това работната маса се движи вертикално надолу на зададена стъпка (равна на дебелината на един слой), и процесът се повтаря до завършване на модела. На фиг. 2.15 е представена технологичната схема на процеса със струйна технология (Inkjet).



Фиг. 2.15 Технологична схема на Inkjet процеса

Основното предимство на този метод е високата разделителна способност, като с него се получават фини модели с висока точност и отлично качество на повърхнините.

Технологията на многоструйната е подобна на Inkjet технологията, като основната разлика е в броя на дюзите – при многоструйната технология те са няколкостотин. Един от големите производители на машини, които работят по многоструйната технология, е 3D Systems, чиято серия Pro-Jet е известна в тази област.

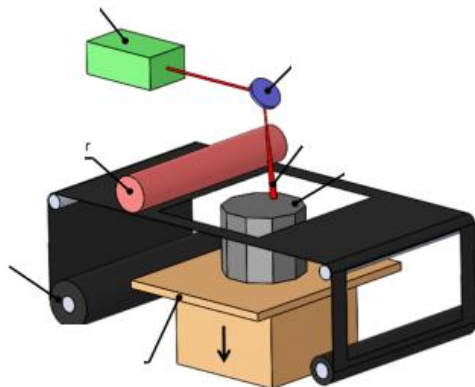
2.4.7. Наслаяване на листов материал (LOM – Laminated Object Manufacturing)

Методът на наслаяване 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 [152].

След това следва автоматично подаване на следващия слой листов материал, обикновено хартия, покрита с лепило. Посредством нагорещена ролка, листовият материал се пресова към вече оформения слой, след което се извършва лазерно изрязване на новия слой.

След завършване на процеса, готовият детайл се сваля от работната платформа и ръчно се отстранява излишният материал. За постигане на по-гладки повърхнини се препоръчва шлифване с шкурка, а при нужда може да се направи и боядисване или лакиране на детайла [153].

Съществува разновидност на този метод, при която нарязването на слоевете се извършва с помощта на нож за рязане на листов материал. В тази версия отделните слоеве се покриват с прахообразна смола и се пресоват, за да се слепят. Този процес дава възможност за създаване на сложни детайли. Технологичната схема на LOM процеса е показана на фиг. 2.16.



Фиг. 2.16. Технологична схема на LOM процеса [152]

2.4.8. 3D ТЕХНОЛОГИИ ИЗПОЛЗВАНИ В ИЗСЛЕДВАНЕТО

За целите на настоящия дисертационен труд бяха използвани следните 3D технологии за печат:

- 3D принтери с FDM технология на печат:

TEVO Tornado е популярен 3D принтер (фиг.2.17), известен със своето съотношение цена-качество и иновативни характеристики. Този принтер е разработен с цел да предостави на потребителите надеждно и достъпно решение за 3D печат, което е подходящо за както за начинаещи, така и за по-опитни потребители [154,157,156].

Ultimaker S5 е професионален 3D принтер (фиг.2.18), който предлага изключителна производителност и гъвкавост, идеален за дизайнери, инженери и малки и средни предприятия. Построен с акцент на надеждност и качество на печата, S5 разполага с двойно екструдирание, което позволява едновременно печат на два различни материала, което е особено полезно за изработка на сложни геометрии и прототипи с поддържащи структури [158,159,160,161,162].

Bambu Lab P1S е високоефективен фюзед депозиционен модел (FDM) 3D принтер (фиг.2.19), предназначен за употреба както в домашни условия, така и в професионални производствени среди [163]. Конструкцията му включва автоматизирани системи за калибриране, включващи сензори за автоматично нивелиране на платното, което значително улеснява подготовката за печат и подобрява точността [164]. Технологията на печат е базирана на FDM, като поддържа разнообразие от термопластични материали. Устройството е оборудвано с тихи стъпкови мотори и звукоизолиращи компоненти, което допринася за ниско ниво на работен шум. Управлението се осъществява чрез интуитивен уеб интерфейс или мобилно приложение, осигуряващо дистанционен контрол и мониторинг на процеса. Допълнителните технически характеристики включват система за филтриране на въздуха, автоматично подаване на нишка и интегрирани функции за

охлаждане, което подобрява качеството и надеждността на печата[165,166,167,168,169,170] .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[171]. За разлика от FDM технологията, при която се екструдира термопластична нишка, PolyJet работи чрез инжектиране на микроскопични капки фотополимерен материал върху платформата, след което те се втвърдяват моментално чрез UV светлина. Процесът се повтаря слой по слой, като се постига изключително висока резолюция – дебелина на слоя 16–30 μm , както и гладки повърхности и фини геометрични детайли. В таблица 2.2 са изложени основните параметри и характеристики на Stratasys Objet260 Connex3 [172,173,174,175,176].

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 слой (горен слой)	хоризонтални слоеве до ~ 16 микрона (0.016 mm)
Резолюция / 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 е част от серията Connex, която използва трипленна печатаща глава, позволяваща едновременно комбиниране на до три различни материала в един и същ обект. Това дава възможност за създаване на реалистични прототипи с различни механични свойства, прозрачност или гъвкавост, както и за печат в пълноцветен режим, благодарение на комбинации от базови фотополимери в CMY цветова гама. В процеса на печат се използват два основни типа материали:

- Моделни фотополимери (напр. Vero, Tango, Digital ABS), които образуват реалния обект.
- Поддържащ материал (SUP705 или SUP706), който се нанася там, където е необходимо временно укрепване на геометрията, и впоследствие се отстранява механично или химически.

Подготовката за печат се извършва чрез софтуера GrabCAD Print или Objet Studio, където 3D моделите (в STL или VRML формат) се импортират, ориентират и конфигурират по отношение на материали, ниво на качество и тип поддръжка. След изпращане на задачата принтерът автоматично извършва целия процес на печат, като гарантира висока точност и повтораемост.

След завършване на изработката, пробите се отделят от платформата и поддържащият материал се премахва чрез водоструйна обработка или алкално почистване (в зависимост от типа support). Получените детайли са с висока размерна точност (до $\pm 0,1$ mm), гладки повърхности и са подходящи както за визуализация, така и за функционални изпитвания.

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

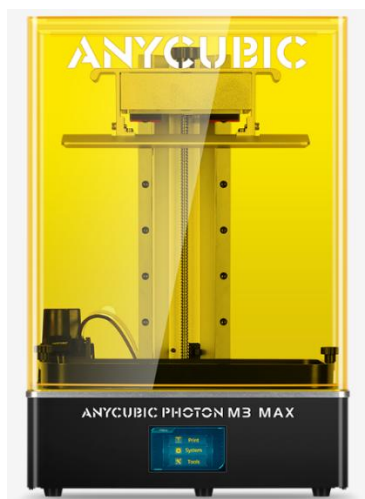
3D принтерът Anycubic Photon M3 Max използва технологията MSLA (Masked Stereolithography Apparatus), известна още като LCD-базиран стереолитографски печат. Тази технология представлява разновидност на фотополимерната стереолитография, при която всеки слой от обекта се формира чрез UV втвърдяване на течна фотополимерна смола. Вместо лазер, както при класическата SLA технология, MSLA принтерите използват LCD екран като маска, който пропуска ултравиолетова светлина само в областите, съответстващи на геометрията на слоя [177-181]. В таблица 2.3 са представени параметрите на 3D принтера Anycubic Photon M3 Max [182,184].

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
Резолюция на екрана	6480 × 3600 пиксела (7K)
XY резолюция	46 μ m
Точност по Z-оста	10 μ m
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 гравирана за по-добро сцепление
Софтуер за рязане	Anycubic Photon Workshop
Допълнителни функции	Интелигентно попълване на смолата, защита на екрана с анти-надраскващо фолио

По този начин всички точки на един слой се експонират едновременно, което значително ускорява процеса на печат и повишава точността. След експонирането, платформата се повдига и върху повърхността се нанася нов слой смола, който отново се втвърдява чрез UV осветяване. Този цикъл се повтаря до завършване на модела.

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 [177].



Фиг.2.20 3D принтер Anycubic Photon M3 Max

2.5. Полимери и композити за 3D печат

Адитивното производство, и по-специално 3D печатът чрез Fused Filament Fabrication (FFF/FDM), се превърна в ключова технология за изработка на полимерни и композитни материали. Чрез нея е възможно постигане на сложни геометрии, ниско тегло и функционални детайли, които трудно се реализират с конвенционални методи като лееене или инжекционно формоване. Полимерите като PLA, ABS, PA, PEEK и техни композити, подсилени с въглеродни влакна, графит, графен или естествени пълнители, се използват все по-често в приложения, изискващи устойчивост на механично и трибологично натоварване [184].

Механични свойства

1) Влияние на пълнителите

Добавянето на твърди пълнители (въглеродни влакна, графен, стъклени влакна) води до повишаване на модула на еластичност, якостта на натиск и твърдостта. Например, PLA с 10 wt.% естествени пълнители показва значително увеличение на компресионната якост спрямо чист PLA [184].

При високо съдържание на пълнители (>15 wt.%) се наблюдават агломерация на частици, пори и слаба междуслойна адхезия, което води до намаляване на якостните показатели [185].

2) Влияние на параметрите на печат

Температурата на дюзата и платното: по-висока температура подобрява междуслойната адхезия, но твърде висока може да предизвика деградация на полимера.

Дебелина на слоя и ориентация на нишките: по-тънки слоеве и оптимално подбран raster angle водят до по-висока якост и по-ниска вероятност от дефекти.

Скорост на печат: твърде висока скорост води до непълно стопяване на материала и по-слаба механична връзка между слоевете [186].

3) Анизотропия

3D-печатаните материали са силно анизотропни, като якостта по оста Z (перпендикулярно на слоевете) е значително по-ниска от тази по оста XY (паралелно на слоевете). Това налага внимателен избор на ориентацията на детайла при проектиране.

Трибологични свойства

1) Коефициент на триене (COF)

При чистите полимери коефициентът на триене е сравнително висок, но добавянето на твърди смазки (графит, MoS₂, PTFE) или влакнести пълнители го намалява значително [187].

С увеличаване на нормалното натоварване COF обикновено се увеличава, поради нарастващо контактно нагряване и деформации, но композитните материали показват по-стабилно поведение.

2) Механизми на износване

Абразивно износване – доминира при наличие на твърди пълнители и груби повърхности.

Адхезионно износване – по-характерно за чистите полимери с по-ниска твърдост.

Фретинг и уморно износване – особено значими при циклични натоварвания и лоша междуслойна връзка.

3) Влияние на структурата от 3D печат

Порьозност и непълна междуслойна свързаност водят до по-бързо разрушаване под трибологичен товар.

Ориентацията на печатните нишки определя дали слоевете ще действат като бариери срещу напукване или ще улесняват отделянето на материал.

Баланс между механични и трибологични характеристики

Най-добри резултати се постигат при композитни филаменти с оптимално съдържание на пълнители (около 5–15 wt.%). Такива материали демонстрират по-нисък коефициент на триене, по-добра устойчивост на износване и повишена механична якост. В инженерни приложения това позволява изработка на лагери, втулки, зъбни предавки,

биомедицински импланти и роботизирани механизми, където се изисква лекота, устойчивост и нисък разход за производство [184, 185].

2.5.1. Видове пластмаси за 3D печат

Има два основни вида пластмаси използвани при 3D печат – термопластмаси и термореактивни пластмаси [188].

1. *Термопластмасите* са най-често използваният вид пластмаса [188]. Основната характеристика, която ги отличава от термореактивните, е способността им да преминават през множество цикли на топене и втвърдяване. Термопластмасите могат да се нагряват и оформят в желаната форма. Процесът е обратим, тъй като не се извършва химическо свързване, което прави възможно рециклирането или топенето и повторното използване на термопласти. Често срещана аналогия за термопластиците е маслото, което може да се разтопи, да се втвърди отново и да се разтопи отново. След всеки цикъл на топене свойствата леко се променят.

2. *Термореактивните пластмаси* (наричани още термореактивни) остават в постоянно твърдо състояние след втвърдяване. Полимерите в термореактивните материали се омрежват по време на процес на втвърдяване, който се индуцира от топлина, светлина или подходящо лъчение. Термореактивните пластмаси се разлагат при нагряване, а не при топене, и няма да се деформират при охлаждане. Рециклирането на термореактивни материали или връщането на материала обратно в неговите основни съставки не е възможно.

3D печатът дава възможност да се създадат прототипи и да се произвеждат части за широк спектър от приложения бързо и рентабилно. Изборът на правилен процес на 3D печат е само едната страна на монетата. До голяма степен този процес зависи от вложените материали, които позволят създаването на модели и части с желани механични свойства, функционални характеристики или външен вид [188]. В Таблица 2.4 са обобщени данни от производителите [189] и изчислени стойности, използвани за целите на проведените изследвания върху използваните материали.

Таблица 2.4 Характеристики на използваните филamenti

Материал	Температура на топене	Т° на печат на глава – nozzle	Т° 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	-	-	-
3DIAKE 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
3DIAKE TPU A95	190 ± 10	200 – 230	60-90		15-25°	55	-	2303	95A	1.20	-	-	352.77	686.84
EasyFiltm HIPS (blue)	± 180 - 260° C	± 220 - 260	0-60	-	-	22	± 51.2		-	1.04	-	-	-	565.26
EasyFiltm 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	-	-	-	-

а) PLA

PLA $[(C_3H_4O_2)_n]$ е полимер, който се използва изключително често в сферата на потребителския 3D печат, тъй като се отпечатва лесно. Полимлечната киселина (PLA) е най-разпространеният вид филament. Тя има по-ниска температура на печат в сравнение с ABS и се деформира по-трудно, което означава, че нагревателното легло не е задължително, макар и да е полезно.

Едно от предимствата на PLA е липсата на неприятна миризма по време на печат (за разлика от ABS). Обикновено се счита за филament без мирис, но понякога може да отделя лек, сладък аромат – в зависимост от конкретния вид PLA. Друг привлекателен аспект е богатото разнообразие от цветове и стилове, в които се предлага. Освен това PLA е до известна степен по-екологично чист в сравнение с много други материали за 3D печат, тъй като е биоразградим при определени търговски постижими условия [188].

Въпреки предимствата си, PLA е по-крехък от други видове нишки за 3D принтери. Поради това не се препоръчва за изработка на обекти, които трябва да издържат на огъване, усукване или чести падания – например калъфи за телефони, износващи се играчки или дръжки на инструменти. Също така не е подходящ за модели, изложени на високи температури, тъй като материалът има склонност да се деформира при около 60°C или повече. За повечето други приложения обаче PLA е отличен и универсален избор за филament при 3D печат [188].

б) ABS

Акрилонитрил бутадиен стирен (ABS $[(C_8H_8.C_4H_6.C_3H_3N)_n]$) е по-малко популярен от PLA за ежедневен 3D печат. По отношение на свойствата на материала обаче, ABS всъщност е умерено по-добър от PLA, въпреки че е малко по-труден за печат – той е склонен към изкривяване без гореща печатна основа и лепило за легло [188].

Често използван при леене под налягане, ABS се намира в много произведени стоки за бита и потребителски стоки, включително LEGO тухли и каски за велосипеди. Продуктите, изработени от ABS, имат висока издръжливост и капацитет да издържат на високи температури, но любителите на 3D принтери трябва да имат предвид високата температура на печат на нишката, склонността да се деформират по време на охлаждане и интензивните, потенциално опасни изпарения. Печати се с отопляемо легло и в добре проветриво пространство. ABS е здрав - издържа на висок стрес и температура. Освен това е умерено гъвкав, въпреки че със сигурност има по-добри опции за това по-надолу в този списък. Заедно тези свойства правят ABS добра нишка за 3D принтер с общо предназначение, но това, където тя наистина блести, е с предмети, които често се боравят, изпускат или нагряват (калъфи за телефони, играчки, които се износват, дръжки за инструменти, компоненти за автомобилни тапицерии и електрически кутии и др.) [188].

в) PETG

Полиетилен терефталатът (PET) е една от най-често използваните пластмаси в света. Най-известен като полимер, използван в бутилки с вода, той се намира и във влакна на дрехи и контейнери за храна. Докато "суровият" PET рядко се използва в 3D печат,

неговият вариант PETG е все по-популярна нишка за 3D принтер. „G“ в PETG означава „гликол“. Като материал за 3D печат, той е естествено по-чист, по-малко крехък и най-важното, по-лесен за печат от основната му форма. Поради тази причина PETG често се смята за добра средна позиция между ABS и PLA, два други често използвани типа нишки за 3D принтери – той е по-гъвкав и издръжлив от PLA и по-лесен за печат от ABS.

Полиетилен котриметилен терефталат (PETT) е друг вариант на PET. Малко по-твърда от PETG, тази нишка за 3D принтер е популярна със своята прозрачност [188].

Три неща, които ентусиастите на 3D принтери трябва да имат предвид, когато използват PETG:

- PETG е хигроскопичен, което означава, че абсорбира влагата от въздуха. Това има отрицателен ефект върху печатаемостта на материала, така че не забравяйте да съхранявате нишката на 3D принтера на хладно и сухо място и, ако е необходимо, да я изсушите преди употреба.
- PETG е лепкав при отпечатване, което прави тази нишка за 3D принтер лош избор за поддържащи структури, но добър за адхезия на слоя.
- Въпреки че не е крехък, PETG се надрасква по-лесно от ABS.

PETG е добър универсален продукт, но се отличава от много други видове нишки за 3D принтер поради своята гъвкавост, здравина и устойчивост на висока температура и удар. Това го прави идеална нишка за 3D принтер за използване за функционални обекти, които могат да изпитат продължително или внезапно напрежение, като механични части, части за принтер и защитни компоненти.

г) TPE, TPU, TPC

Както подсказва името, термопластичните еластомери (TPE) по същество са пластмаси с качества, подобни на каучук, което ги прави изключително гъвкави и издръжливи. Като такъв, TPE обикновено се използва за производство на автомобилни части, домакински уреди и медицински консумативи. В действителност TPE е широк клас съполимери (и полимерни смеси), но въпреки това се използва за етикетирание на много налични в търговската мрежа видове нишки за 3D принтер. Меки и разтегливи, тези нишки могат да издържат на физическото наказание, което нито ABS, нито PLA могат да понесат. От друга страна, печатането не винаги е лесно, тъй като TPE може да бъде труден за екструдирание.

Термопластичният полиуретан (TPU) е особена разновидност на TPE и е популярна нишка за 3D принтер. В сравнение с обикновения TPE, TPU е малко по-твърд – което го прави по-лесен за печат. Освен това е малко по-издръжлив и може по-добре да запази еластичността си на студ.

Термопластичният кополиестер (TPC) е друга разновидност на TPE, макар и не толкова често използван като TPU. Подобно в повечето отношения на TPE, основното предимство на TPC е неговата по-висока устойчивост на химическо и UV излагане, както и на топлина (до 150 градуса). Използвайте TPE или TPU, когато създавате обекти, които трябва да понесат много износване. Ако вашата 3D отпечатана част се огъва, разтяга или компресира, тези нишки за 3D принтер трябва да са готови за задачата. Примерните разпечатки могат да включват играчки, калъфи за телефони или устройства за носене

(като ленти за китки). TPC може да се използва за подобни приложения, но се справя особено добре в по-сурови среди, като на открито.

д) Найлон

Найлонът, популярно семейство синтетични полимери, използвани в много промишлени приложения. Най-често, предметите, образувани от найлон(полиамиди) се изработват от фин, бял гранулиран прах чрез SLS технология. Въпреки това, някои варианти на този материал се предлагат и под формата на нишки, които се използват при FDM 3D принтирането. Като нишка за 3D печат, той се отличава там, където здравината, гъвкавостта и издръжливостта са ключови изисквания. Друга уникална характеристика на тази нишка за 3D принтер е, че може да се боядиса преди или след процеса на печат. Отрицателната страна на това е, че найлонът, подобно на PETG, е хигроскопичен, което означава, че абсорбира влагата, така че не забравяйте да го съхранявате на хладно и сухо място, за да поддържате нишката в отлично състояние, осигурявайки по-добро качество на отпечатъците.

Найлонът е стабилен, твърд, гъвкав и устойчив на удари материал, с отличен баланс между химически и механични характеристики. Поради своята биосъвместимост, може да се използва за създаване на предмети, които влизат в контакт с храна (с изключение на храни, които съдържат алкохол). Той има множество приложения в различни сектори, в това число космическия пазар, автомобилния пазар, роботиката, за създаване на инструменти, функционални прототипи или механични части (като панти, катарамии или зъбни колела).

е) PC (поликарбонат)

Поликарбонатът (PC), освен че е един от най-здравите нишки за 3D принтер е изключително издръжлив и устойчив както на физическо въздействие, така и на топлина, способен да издържа на температури до 110 градуса. Освен това е естествено прозрачен, което обяснява използването му в търговски артикули като бронеустойчиво стъкло, водолазни маски и електронни дисплеи. За разлика от акрил и плексиглас материала, компютърът е умерено гъвкав (макар и не толкова, колкото найлона, например), което му позволява да се огъва, докато в крайна сметка се деформира.

Нажежаемата нишка за PC 3D принтер е хигроскопична, абсорбира вода от въздуха, така че трябва да се съхранява на хладно и сухо място, за да се осигури по-добро качество на разпечатките.

Поради своите физически свойства, поликарбонатът е идеална нишка за 3D принтер за части, които трябва да запазят своята здравина, здравина и форма в среда с висока температура, като електрически, механични или автомобилни компоненти.

ж) Екзотични нишки за 3D печат (Хибридни материали)

Съществуват различни хибридни материали, които съчетават основни пластмаси с прахове, за да им придадат нов цвят, покритие или допълнителни свойства. Най-често 70% от състава им е PLA. Останалите 30% могат да бъдат нишки на дървена основа, вариращи от бамбук, корк, дървесен прах и други. В съчетание с PLA, тези материали придават на хибридната нишка по-органична текстура.

Пластичният поток в контактната зона на инструмента – работна зона увеличава коефициента на триене. Температурата в зоната на контакт може също да надвишава точката на топене на материала. Поръзността на отпечатаните части също играе важна роля върху трибологичните процеси като триене и износване. При избора на материал за 3D печат е важно той да бъде съобразен с желанния изходен продукт (детайл). Най-често влияещите фактори при избора на материал за 3D печат са: сила, гъвкавост, издръжливост, изкривяване, температура на печат, безопасност.

Тези нишки са особено популярни при използване на 3D принтери за развлечение. В тази категория попадат: Пълнени с дърво, Пълнени с метал, Биоразградим, Проводими, Магнитни, Глина/керамика, Въглеродни влакна, Стъклени влакна. Други хибридни материали включват метални прахове, предназначени за работа с FDM-базирани технологии, които придават на частите метален завършек. Те се основават на мед, бронз, сребро и други. 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	Среден (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

3) Композити

Композитите са подходящи, когато изработвате леки, но здрави части, тъй като те увеличават здравината на даден елемент, без да добавят тежест. Укрепващите материали съществуват в две форми – като къси или като непрекъснати влакна. В първия случай, нарязаните влакна, които се състоят от сегменти с дължина по-малка от милиметър, се смесват в традиционните пластмаси за 3D печат, за да се увеличи твърдостта и в по-малка степен здравината на компонентите. Те могат да се смесват с термопластични материали като найлон, ABS или PLA.

Като алтернатива, влакната могат да се добавят непрекъснато към термопластите, за да съставят по-силна част. В 3D принтирането, основно се работи с въглеродни влакна, но могат да се използват и други влакна като стъклени фибри или кевлар.

2.5.2. Видове смоли за 3D печат

Смолата (синтетичната смола) е UV-втвърдяваща течна пластмаса. Тези материали се използват в 3D принтерите за стереолитография. Фоточувствителната смола може да бъде втвърдена с лазер или светлина и по този начин да се трансформира в солиден модел. Течната смола се излага на желаните места с 3D принтера. Тази техника прави възможно производството на компоненти с висококачествена повърхност и висока детайлност. Смолата има предимството, че разполага с няколко материални свойства [190].

Методите за 3D принтиране, базирани на фотополимеризация, използват UV-чувствителна смола за създаване на обекти слой по слой. Те използват източник на светлина като лазер или LCD екран за втвърдяване на течен фотополимер. Тези технологии включват SLA, DLP и PolyJet.

Изграждането на части с помощта на смола води до създаването на модели с висока детайлност и значително гладка повърхност. Въпреки това, като недостатък може да се отбележи ограничеността на цветовата гама при работа с такъв материал. Стандартната смола за 3D печат има свойства, подобни на ABS. Съществуват и по-модерни смоли за технически приложения в стоматологията, инженерството и други сектори. Съществуват и други видове смола, които предлагат по-голяма гъвкавост, и могат да се използват за изработка на бижута [191].

През годините производителите разширяват гамата си от течни фотополимери, за да отговорят на производствените нужди от различни сектори. Благодарение на това, на пазара може да намерите смоли, които имат устойчивост на висока температура, могат да издържат на големи удари или които имат високи свойства на удължаване.

- а) Стандартна смола за 3D принтери
- б) Твърда смола за 3D принтери
- в) Водоразтворими смоли за 3D принтери - Подходящите за миене с вода смоли за 3D печат могат да се почистват лесно и бързо с просто изплакване с вода. Предлагани в голямо разнообразие от цветове и материали, те осигуряват висока прецизност и фантастични детайли на вашите модели. Те са подходящи за широк спектър от приложения, от изработка на прототипи и функционални части до създаване на произведения на изкуството и бижута.
- г) Дентална смола за 3D принтер
- д) Гъвкава смола за 3D принтер – Има голям избор от висококачествени и гъвкави смоли за 3D печат. Тези смоли са идеални за отпечатване на гъвкави и издръжливи части като гума или TPE.
- е) Смола за леене за 3D принтери

- ж) Термоустойчива смола за 3D принтер
- з) Оцветители за смоли за 3D принтери
- и) Почистващи средства и аксесоари за смола за 3D принтер

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 [192-197].

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 обекти EDEM Simulator, анализ на резултати, графики, отчитане на ъгли, брой мелещи тела, износване и др. EDEM Analyst.

С EDEM Creator може лесно и бързо да се създават модели на материалите. Предвидени са инструменти, с които лесно да се моделират формата, плътността и контакта на частиците. EDEM Simulator е средата, в която се конфигурира и симулира представянето на движението и взаимодействието на 3D моделирани образци. Паралелната ефективност увеличава скоростта при работа с големи модели. EDEM Analyst предоставя инструменти за последваща обработка, анализ, визуализация и сваляне на симулационни данни. EDEM осигурява бърза 3D визуализация на системата за насипване на голям брой частици [192-197].

2.7. Заключение

Трибологичните изпитвания имат ключово значение за развитието и поддръжката на съвременните технологии. Те предоставят данни, които са решаващи за проектирането на нови продукти, усъвършенстването на съществуващите и за повишаване на общата производителност на системите. Благодарение на тях инженерите могат да диагностицират и отстраняват реални механични проблеми, като например заклиняване на компоненти или прекомерен шум, което води до по-надеждна работа на машините.

Освен това изпитванията подпомагат оптимизацията на материалите, като насочват избора на най-подходящи сплави, повърхностни обработки и покрития според конкретното приложение. Те също така дават възможност за задълбочена оценка на различни смазки – масла, греди и други – с цел да се намерят най-ефективните решения за намаляване на триенето и износването.

В крайна сметка, чрез по-добро разбиране на трибологичното поведение, инженерите успяват да удължат експлоатационния живот на компонентите, да намалят риска от аварии и да повишат ефективността и надеждността на машините и системите.

Изпитването за твърдост по Рокуел на меки образци е важен метод за определяне на механичните свойства на материалите. Правилният избор на скала, прецизната подготовка на образците и стриктното спазване на методологията и съответните

стандарти са от съществено значение за получаване на надеждни и точни резултати. Интерпретацията на получените стойности трябва да се извършва внимателно, като се вземат предвид използваната скала и характеристиките на тествания материал.

В съвременните условия значението на трибологията се преплита с бързото развитие на адитивните технологии. Познаването на 3D печата и на материалите, които се използват в него – особено полимерите и композитите, е от ключово значение. Те все по-често се прилагат при производството на образци, прототипи и крайни продукти. Комбинирането на трибологичните знания с възможностите на 3D печата дава възможност не само за по-бърза и ефективна разработка, но и за по-добро прогнозиране на поведението на новите материали и изделия при реални условия на работа.

Съвременното развитие на материалознанието и инженерството показва, че трибологичните изпитвания и адитивните технологии вървят ръка за ръка. Чрез изследване на процесите на триене, износване и смазване се събират данни, които са решаващи за избора и оптимизацията на материалите. От друга страна, 3D печатът предоставя възможност за бързо изработване на пробни образци и функционални детайли, върху които тези данни могат да се приложат и проверят.

Познаването на различните технологии за 3D печат е от голямо значение, защото всяка от тях предлага специфични възможности

- 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 (метали, керамики или пясък), 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.

В крайна сметка, интеграцията на 3D печата и трибологията отваря пътя към създаване на по-надеждни, издръжливи и иновативни продукти, които отговарят на съвременните индустриални и обществени изисквания.

Глава 3.

Съставяне на методики за провеждане на изследванията

През последното десетилетие, адитивните технологии привличат все по-голям интерес от страна на индустрията и обществото, както и в областта на науките. Производителите извършват сериозни инвестиции в разработването на специални полимери, които съчетават отлични механични и трибологични свойства. Тези материали са предназначени за използване в механизми, където трение е неизбежно и често дори необходимо. В допълнение, се провеждат множество изследвания в областта на трибологичните свойства на различни образци, изработени чрез различни 3D технологии и материали.

Настоящата глава е посветена на разработването, обосновката и представянето на методиките, използвани при провеждането на експерименталните изследвания върху 3D отпечатани полимерни и композитни материали. Разработването на прецизни, възпроизводими и научно обосновани методики е от съществено значение за осигуряване на надеждността и съпоставимостта на получените резултати. Всяка методика е разработена в съответствие с особеностите на използваните материали, целите на изследването и техническите възможности на наличната апаратура, описана в глава 2 на дисертационния труд.

Основната цел на методологичния етап е да се дефинират стандартизирани процедури за изготвяне, изследване и анализ на 3D отпечатани образци, така че резултатите да могат да бъдат приложими както в научноизследователската, така и в инженерната практика. Представените методики обхващат целия изследователски процес – от производството на образците до симулационното моделиране на техните трибологични характеристики.

Първата разработена методика е методиката за 3D принтиране, при която са определени условията за изготвяне на изпитвателните образци чрез адитивни технологии. Производството на пробите е извършено с използване на съвременни 3D принтери, позволяващи прецизен контрол върху параметрите на процеса. Този метод е финансово достъпен и предлага широки възможности за създаване на образци със сложна геометрия. В методиката са отчетени специфичните особености на използваните технологии (като моделиране чрез разтопено отлагане – FDM), характеристиките на принтера, геометрията на модела и предназначението на детайла.

Втората методика – за анализ на микротвърдостта на полимери и композити – е разработена с цел количествена оценка на механичната устойчивост на изследваните материали. Използвани са апаратурите EBP BRV-187.5T за изпитване по метода на отпечатъка и металографски микроскоп Olympus BX53M, снабден с цифрова камера Olympus DP23 за последващо измерване и анализ. Допълнително е приложен методът за определяне на твърдост по Шор, реализиран чрез Digital Shore Hardness Tester SAUTER HD, който позволява обективно сравнение между различни полимерни и еластомерни материали. Този метод се

основава на измерване на съпротивлението на материала срещу проникване на твърд връх в повърхността му, като така се оценява относителната твърдост или мекота на изследвания образец.

Третата методика е насочена към изследване на трибологичните свойства на 3D отпечатани полимерни и композитни материали. Чрез нея се определят основните параметри, характеризиращи трибологичното поведение – коефициент на триене при плъзгане, коефициент на триене при търкаляне и коефициент на възстановяване на еластичността след деформация. Тези изследвания са проведени с разработено експериментално устройство с гравитационно действие, което осигурява висока точност и възпроизводимост на резултатите.

Четвъртата методика е свързана със създаването на симулационни модели в средата на EDEM Software, която позволява виртуално възпроизвеждане и анализ на поведението на частиците и материалите при различни условия на натоварване. В модула Creator на програмата се задават входните параметри на симулацията, като геометрия, материални свойства и гранични условия, което дава възможност за съпоставка между експерименталните резултати и числените модели.

Всяка от разработените методики представлява интегрална част от общата изследователска концепция на дисертационния труд. Тяхното прилагане осигурява системен и научно аргументиран подход за оценка на трибологичните и механичните свойства на 3D отпечатани материали, както и надеждна основа за валидиране на симулационните модели, използвани в по-нататъшните етапи на изследването.

3.1. Методики за 3D принтиране

Производството на пробите е извършено чрез използване на устройство за 3D принтиране. Този съвременен метод за печат е финансово осъществим и предлага разнообразие от възможности за производство на сложни конфигурации. Използването му улеснява дизайнерите да актуализират материални обекти въз основа на модел за компютърно проектиране (CAD). Той е възприет в различни сектори, включително селско стопанство, индустрия, медицина и др. Сред най-популярните методи за производство на добавки е моделирането на разтопено отлагане (FDM), което включва екструдиране на термопластични нишки, на стъпки, за създаване на слоеве. Предлагащите 3D принтери, които работят по различни технологии налагат използването на различни методики. Методиките трябва да бъдат съобразени с вида на принтера, технологията за 3D печат, особеностите и геометрията на изграждания модел (детайл), целта на детайла и др. [198].

Процесът на 3D печат с FDM (Fused Deposition Modeling) на изследваните проби (плочки, цилиндри и сфери) е еднакъв и включва няколко основни стъпки:

1. Подготовка на модела

- Създаване на 3D модел: Първата стъпка е да се проектира 3D модел с помощта на CAD (Computer-Aided Design) софтуер, като SolidWorks, Autodesk Fusion 360 или Blender.
- Експорт на модела: Моделът се експортира в STL (Standard Tessellation Language) формат, който е стандартен формат за 3D печат.

2. Сливане на модела

- Слизеринг (Slicing): След експортиране, моделът се зарежда в софтуер за слайсинг (например Cura, PrusaSlicer или Slic3r). Този софтуер разделя 3D модела на хоризонтални слоеве (slices) и генерира G-код, който съдържа инструкции за 3D принтера за движение, температура и други параметри.

- Настройки за печат: В слайсера се задават настройки, като:

- Температура на дюзата: Оптимална температура за разтопяване на филамента.
- Температура на платформата: Поддържа температура за адхезия на модела.
- Скорост на печат: Колко бързо да се движи дюзата.
- Запълване (infill): Процент на запълване на вътрешността на модела, който влияе на здравината и теглото на крайния продукт.
- Брой слоеве: Определя дебелината на слоя и финала на повърхността.

3. Подготовка на принтера

- Настройка на принтера: Нужно е 3D принтерът да е ниво (bed leveling) и платформата да е чиста. При по-специфични случаи, платформата може да се покрие с адхезивен разтвор или лепило за подобряване на адхезията.

- Зареждане на филамента: Филаментът (PLA, ABS, PETG и т.н.) се зарежда в принтера.

4. Печат

- Стартиране на процеса: След като всичко е подготвено, се стартира печатът. Принтерът ще следва инструкциите, записани в G-кода, и ще извършва следните действия:

- Преместване на дюзата до начален изходен код.
- Загряване на дюзата до зададената температура.
- Разпечатване на слоя по слой, като дюзата екструзира разтопения филамент върху платформата, като образува слоевете един върху друг.
- Охлаждане на всеки слой, ако е необходимо.

5. Завършване на печата

- Отстраняване на модела: След като печатът приключи, платформата се охлажда, и моделът може да бъде внимателно отстранен от платформата.

-Пост-обработка: В зависимост от материала и изискванията, моделът може да премине през различни пост-обработки, като шлайфане, боядисване или сглобяване на различни части. Ако е нужно отстраняване на съпорт е нужна допълнителна обработка в зависимост от характеристиките на съпортния материал (дали е водорастворим, еластичен или плътен или др.).

6. Проверка на качеството - След печата е важно да се провери качеството на модела, за да се уверите, че няма дефекти и че моделът е изработен според спецификациите.

Тази методика осигурява основна структура на производствения процес на FDM/FFF принтиране. В зависимост от типа на използвания филамент и спецификата на проекта, може да има допълнителни стъпки или настройки.

I. FDM технология на печат - Отпечатването на изследваните проби, получени чрез FDM технология на печат, беше извършено със следните 3D принтери:

- а) Tevo Tornado** — FDM принтер с отворен работен обем и директно подгрявано легло (описан в глава 2);
- б) Ultimaker S5** — индустриален FDM принтер с по-висока точност и контролирана среда на печат (описан в глава 2).

В зависимост от серията, G-code файловете бяха прехвърлени към принтерите чрез SD карта (Tevo Tornado) или мрежова връзка (Ultimaker S5). Преди започване на печата леглата на принтерите бяха нивелирани, а дюзите — почистени.

След приключване на печата пробите бяха оставени да се охладят до стайна температура и внимателно отделени от печатната платформа. Проверена беше точността на размерите и повърхностното качество, като се установи, че отклоненията са в рамките на толерансите, типични за FDM технологията (± 0.3 mm по дължина и ширина).

Повечето полимерни материали нямат специфика при настройка на температурите и стойностите на печат. Повечето производители отбелязват необходимите настройки за печат на филamentите. При някои материали са необходими допълнителни тестове, за да се получи желания детайл. Например при HIPS филament, е необходимо печатащата глава да се нагрее до 220-260 °C и печатащата основа да се загрее до 90-110 °C с охлаждане 0-30%. За това изследване са подготвени плочки с размери 120x60x10 mm и 60x60x10 mm за експериментите. Пробите са със следните параметри, необходими за 3D отпечатване на материала [4]: Температура на дюзата – 245 °C; Температура на леглото – 70 °C; Височина на слоя – 0,2 mm; Брой линии на стената – 2; Пълнеж – 20%; Модел на пълнеж – триъгълници; Скорост на печат – 60 mm/s; Охлаждане от 0%; Използвана строителна плоча – сал с въздушна междина 0,1 mm; Производител – FormFutura.

II. Stratasys objet 260 Connex3 - Технологията PolyJet

За изработването на пробите е използвана PolyJet технология на Stratasys, която се отличава с по-висока прецизност в сравнение с FDM. Тя работи чрез инжектиране на микроскопични капки фотополимер, които се втвърдяват моментално чрез UV светлина, позволявайки постигане на изключително гладки повърхности, фини детайли и комбиниране на няколко материала и цветове в един обект.

Методиката за отпечатване на образците чрез 3d принтер Stratasys , работещ с технологията PolyJet включва следните стъпки:

- 1) Подготовка на 3D моделите** - Първоначално триизмерните модели на пробите бяха създадени в CAD софтуер, след което експортирани във формат STL. Геометрията на всеки модел бе проверена за коректност – отсъствие на отворени ръбове и пресичащи се повърхности. Моделите бяха ориентирани така, че да се оптимизира използването на поддържащ материал и да се гарантира максимална точност.

- 2) **Настройка на печата** - Подготовката за печат бе извършена чрез софтуера GrabCAD Print / Objet Studio. Файловете бяха импортирани, позиционирани върху платформата и конфигурирани с подходящи настройки: избор на фотополимерен материал (серия Vero / Tango / Digital ABS), задаване на режим на качество (High Quality), както и автоматично генериране на поддържащ материал (SUP705 или SUP706). След преглед и изчисление на необходимите ресурси, задачите бяха изпратени към принтера.
- 3) **Подготовка на принтера** - Преди началото на печата принтерът бе подготвен: проверени бяха нивата и правилното поставяне на касетите с моделния и поддържащия материал, почистена бе платформата за печат, извършена бе проверка на печатащите глави (Head Check) и почистващи процедури при необходимост. Температурните условия в помещението се поддържаха в препоръчания диапазон от 20–25 °C.
- 4) **Печатен процес** - Самият процес на печат протече автоматично след стартиране на задачата. Принтерът нанасяше последователни слоеве фотополимер (с дебелина на слоя 16–30 μm), като всеки слой се втвърдяваше незабавно с UV лампи. След приключване платформата се върна в изходно положение и моделите бяха внимателно отделени.
- 5) **Премахване на поддържащ материал** - Премахването на поддържащия материал бе извършено чрез две техники в зависимост от геометрията на образците и използвания support: при SUP705 — механично с водоструйка с умерено налягане; при SUP706 — чрез накисване в алкален разтвор на натриева основа, комбиниран с ултразвукова вана, последвано от изплакване с вода. След това пробите бяха внимателно подсушени.
- 6) **Контрол на качеството** - Накрая бе извършен контрол на качеството – визуална проверка за дефекти и остатъци от поддържащ материал, както и измерване на критичните размери. PolyJet технологията осигури висока точност на изработените проби (до $\pm 0,1 \text{ mm}$) и гладка повърхност, което ги прави подходящи за последващи изследвания и изпитвания.

III. Anycubic Photon M3 Max - LCD/SLA технология

За изработване на образците (цилиндри и тънки плочки) бе използван 3D принтер Anycubic Photon M3 Max, който работи по LCD/SLA технология (лекоидна фотополимеризация). Този метод се базира на затвърдяване на фотополимерен материал слой по слой чрез UV светлина, която преминава през LCD маска, определяща геометрията на всеки слой.

Процес на печат и постобработка:

- 1) **Подготовка на модела:** 3D моделите се създават в CAD софтуер и се експортират във формат STL.
- 2) **Подготовка за печат:** STL файловете се импортират в софтуера Anycubic Photon Workshop, където се задават ориентация, качество на слоя и поддържащи структури.

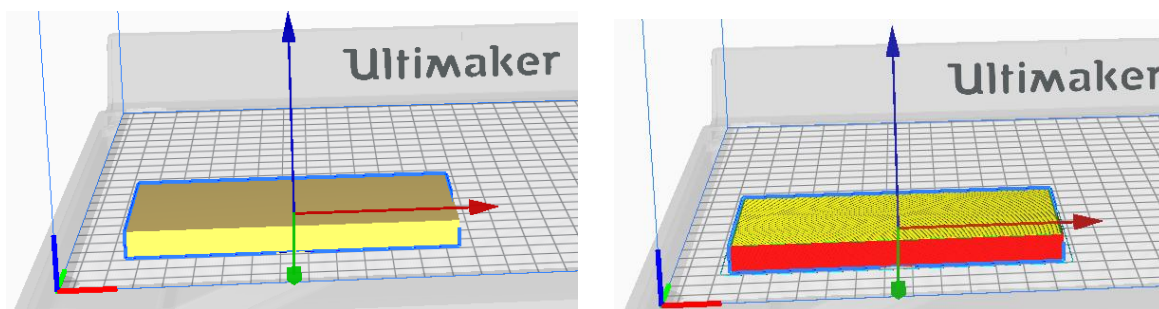
- 3) **Печат:** Принтерът нанася последователни слоеве фотополимер, като UV светлината втвърдява материала по зададената форма.
- 4) **Постобработка:** След отпечатването, моделите се почистват от остатъчна смола и се втвърдяват допълнително с Anycubic Wash and Cure 3 Plus, чрез измиване с изопропилов алкохол и UV облъчване за пълно полимеризиране.

3.1.1. Съставяне на методика за 3D принтиране на плочки

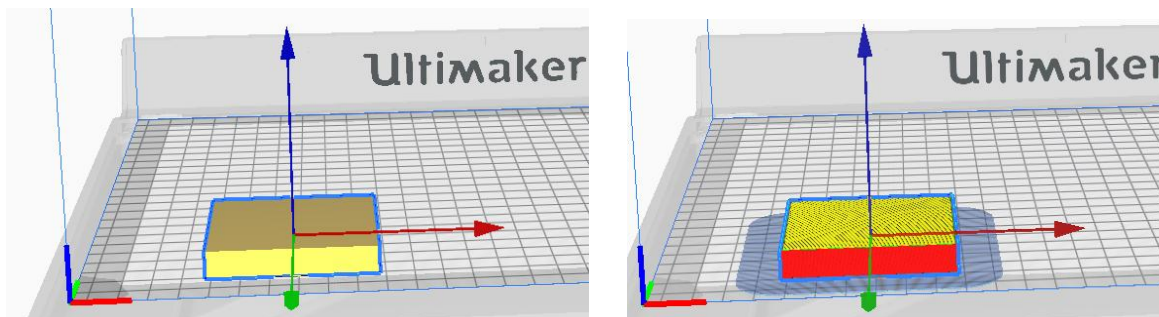
За изработването на образците беше разработена и приложена методика за 3D принтиране, включваща последователни етапи по моделиране, подготовка за печат и реално отпечатване на пробите.

Първоначално геометричните обекти (плочки) бяха създадени в програмата 3D Builder (Microsoft). За всяка от двете размерни конфигурации — $120 \times 60 \times 10$ mm и $60 \times 60 \times 10$ mm — бяха генерирани прости правоъгълни паралелепипеди със зададени точни размери. Плочките бяха отпечатани в хоризонтално положение, с плътно запълване и без допълнителни опорни структури, тъй като геометрията не го изисква. Моделите бяха експортирани във формат STL, който е стандартен за последваща обработка в слайсинг софтуер.

На фиг.3.1 са показани подготвени плочки с размери $120 \times 60 \times 10$ mm, а на фиг.3.2 са показани подготвените в софтуера плочки с размери $60 \times 60 \times 10$ mm за експерименталните изследвания.



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



Фиг. 3.2. Моделиране на плчка с размер $60/60/10$ mm.

За изработването на образците беше разработена и приложена методика за 3D принтиране, включваща последователни етапи по моделиране, подготовка за печат и реално отпечатване на пробите.

Първоначално геометричните обекти (плочки) бяха създадени в програмата 3D Builder (Microsoft). За всяка от двете размерни конфигурации — $120 \times 60 \times 10$ mm и $60 \times 60 \times 10$ mm — бяха генерирани прости правоъгълни паралелепипеди със зададени точни размери. Плочките бяха отпечатани в хоризонтално положение, с плътно запълване и без допълнителни опорни структури, тъй като геометрията не го изисква. Моделите бяха експортирани във формат STL, който е стандартен за последваща обработка в слайсинг софтуер.

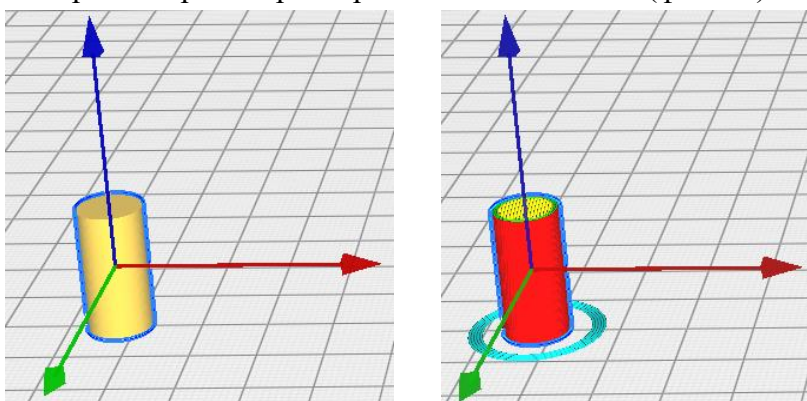
След създаването, STL файловете бяха заредени в софтуера Ultimaker Cura. В програмата беше извършена настройка на параметрите за печат, включително:

- ориентация на модела — плочките бяха позиционирани хоризонтално върху работната платформа;
- дебелина на слоя — зададена в диапазон 0.2 mm, с цел балансиране между скорост и качество;
- плътност на запълване (infill) — 20%;
- схема на запълване — „Zig-Zag“ или „Triangles“, в зависимост от серията;
- температура на дюзата и леглото — зададени според използвания филамент (напр. PLA: 200 °C за дюзата и 60 °C за леглото);
- скорост на печат — около 50 mm/s;
- активирана подложка Brim по периферията за подобряване на адхезията към леглото или Skirt. В зависимост от материала за печат.

След финализиране на параметрите, слайсингът беше извършен в Cura, като за всяка плочка беше генериран G-code файл, съвместим със съответния 3D принтер.

3.1.2. Съставяне на методика за 3D принтиране на цилиндри

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



Фиг. 3.3 Моделиране на цилиндри в софтуерна среда

Методиката за 3D принтиране на цилиндрични тела изисква оптимизация на параметрите на процеса: избор на подходяща дебелина на слоя, настройка на температурата на дюзата и платформата, както и осигуряване на надеждна адхезия към

печатната повърхност. Тъй като геометрията на цилиндъра е относително проста, в повечето случаи не се налага използване на опорни структури, което улеснява процеса и намалява разхода на материал. Въпреки това, за постигане на максимална механична якост е зададено 100% запълване (infill).

Процесът започва със създаване на CAD модел на цилиндъра, който се конвертира във формат STL, за да бъде обработен от софтуера за нарязване (slicer). В изследването са използвани различни материали: PLA (поради лесна обработваемост), SteelFeel (полимер с метални частици за повишена изнosoустойчивост) и CarbonFill (полимер с въглеродни частици за по-висока твърдост). Филаментът се подава от намотка към екструзионната дюза, където се разтопява и се нанася върху платформата за изграждане. Движението на дюзата се управлява по координати X, Y и Z, като прецизно следва цилиндричната форма.

Настройките в Ultimaker Cura включват: температура на дюзата и платформата (в зависимост от използвания материал), дебелина на слоя между 0.1–0.2 mm за по-високо качество на повърхността, 100% запълване, както и избор на подложка (brim или raft) за по-добро закрепване на цилиндъра към работната повърхност. В конкретния експеримент е подготвен CAD модел на цилиндър с височина 20 mm и радиус 5 mm, който след конвертиране в STL е отпечатан при пълно запълване.

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

За определяне на коефициента на триене при търкаляне и коефициента на възстановяване се подготвиха 3D отпечатани сфери с диаметър 9 mm със същите характеристики с изключение на запълването, което е настроено на 100% (infill).

Принтирането на сферични тела чрез технологии за адитивно производство, базирани на метода на стопяване и екструзия на нишка (Fused Deposition Modeling, FDM), представлява сериозно предизвикателство. Това се дължи на специфичния начин на формиране на обекта – чрез полагане на последователни слоеве разтопен полимерен филамент [199].

При цилиндрични или призматични геометрии натрупването на слоевете се осъществява сравнително стабилно, тъй като контактната площ между отделните слоеве е по-голяма. При сфери обаче се наблюдават редица трудности:

- Намаляване на опорната площ – с увеличаване на кривината в горната част на сферата, всеки следващ слой се опира върху значително по-малка площ от предходния. Това води до риск от деформации и свличане на материала.
- Разтичане на филамента – поради високата температура и гравитационното действие, екструдираният полимер има склонност да се разтича, особено в зоните с голям ъгъл на наклон спрямо хоризонталната равнина.
- Необходимост от опори (supports) – за да се предотврати деформацията, често се налага генериране на допълнителни опорни структури, които увеличават времето за изработка, разхода на материал и нуждата от пост-обработка.
- Грапавост на повърхността – при сферични повърхности ясно се проявява т.нар. стъпаловиден ефект (stair-stepping effect) [200], тъй като слоевете не могат напълно да възпроизведат плавната кривина на сферата. Това води до намалено качество на повърхността и необходимост от допълнително шлайфане или полиране.

В резултат, методиката за 3D принтиране на сферични тела изисква оптимизация на параметрите на процеса: избор на подходяща дебелина на слоя, настройка на температурата на дюзата и платформата, както и прецизно генериране на опорни структури. В някои случаи се препоръчва промяна на ориентацията на обекта върху печатната платформа или използване на алтернативни технологии за адитивно производство (например стереолитография – SLA), които по-добре възпроизвеждат сложни криволинейни геометрии.

Процесът започва със създаване на CAD модела на сферата, който се конвертира във формат STL, за да бъде разпознат от софтуера за нарязване (slicer) [201–203]. В конкретното изследване са използвани различни материали: PLA, SteelFeel (полимер с метални частици за подобрени механични характеристики) и CarbonFill (полимер с въглеродни частици, повишаващи твърдостта). По време на печат филamentът се подава от намотка към екструзионна дюза, където се разтопява и се нанася върху платформа за изграждане (build plate). Движението на дюзата и платформата се контролира по координати X, Y и Z.

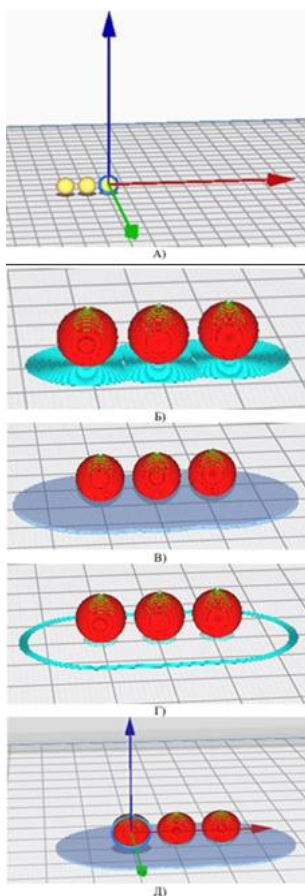
Настройките в Ultimaker Cura включват: температура на дюзата и платформата (специфични за всеки материал), скорост на печат, процент на запълване, вид „подложка“ за адхезия, както и броя на детайлите за едновременно принтиране. За целите на експеримента е подготвен CAD модел на сфера с диаметър 9 mm, който след конвертиране в STL е отпечатан при пълно запълване. Проведени са опити с различни видове подложки и температурни режими. За да се оптимизира процесът, експериментите са проведени с по 3 сфери едновременно, което позволява да се пести време и материал.

След приключване на печата поддържащите структури се отстраняват ръчно. Получените обекти могат да бъдат допълнително шлайфани, фрезовани или боядисани, с цел подобряване на външния вид и функционалността [204–206]. Изразходваното количество материал и времето за екструдирание варират в зависимост от използвания тип подложка и конкретния принтер. В Таблица 3.1 са представени отчетените данни, изведени от софтуера [207].

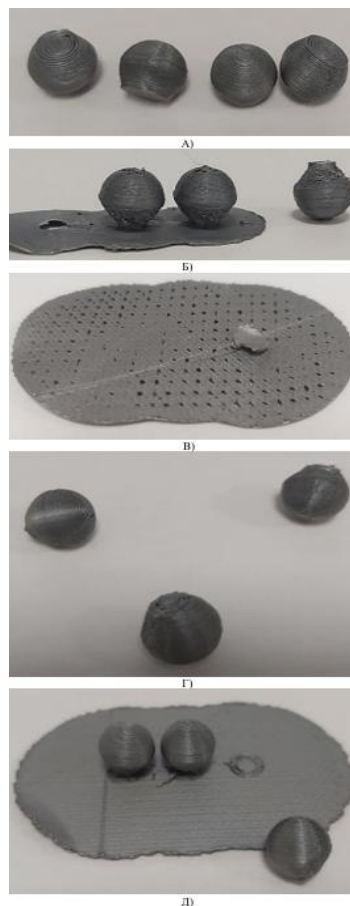
На фиг. 3.4 е показана визуализация моделираните сфери, а на фиг. 3.5 са показани вече отпечатаните сферични обекти, изработен при използване на различни типове подложки за адхезия. Представени са пет варианта: без подложка (А), Brim (Б), Raft (В), Skirt + Support (Г) и Raft +Support (Д). Всеки от тези методи оказва различно влияние върху стабилността на сферата по време на печат и върху качеството на крайната повърхност.

Таблица 3.1. Количество използван материал и време за печат

	Tevo 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 (Shore hardness) представлява широко използван метод за определяне на твърдостта на различни материали, като особено приложение намира при полимери и еластомери. Методът се основава на принципа на измерване на съпротивлението на материала срещу проникване на твърд връх в неговата повърхност. По този начин се оценява степента на мекота или твърдост на изследвания образец.

Измерването на твърдостта по Шор се извършва с помощта на специализиран дигитален дурометър Sauter HD, монтиран към тестов стенд с лост за измерване на Shore

твърдост в пластмаси, към стъклената основа се поставя образец, получен чрез 3D принтиране. Върху повърхността на материала се прилага стандартизирано усилие, след което се отчита дълбочината на проникване на върха. Получените стойности се изразяват в Шорови единици (Shore units). В зависимост от свойствата на тестваните материали се използват различни скали на Шорова твърдост (напр. Shore A, Shore D и др.), което позволява по-точна характеристика на разнообразни видове материали. На фиг. 3.6 е представена снимка на използвания уред за измерване на микротвърдостта по Шор.

Микротвърдостта по Шор се базира на същия принцип като стандартното измерване на Шорова твърдост, но се характеризира с по-висока чувствителност и способност за отчитане на по-фини разлики в стойностите. Този метод се прилага основно при тънки образци или при материали с мека и вискоеластична структура, при които се изисква по-голяма точност и прецизност на измерването [122].



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

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

В настоящото изследване на твърдостта е използвана SLA технологията поради високото качество на изработваните обекти, изразяващо се основно в гладки повърхности и висока детайлност [208, 209]. Използван е Standard Resin материал, който е подложен на различни пост-втвърдителни процеси, с цел да се определи оптималното време за втвърдяване при бъдещо приложение на обектите за хора с нарушено зрение. След процеса на втвърдяване са извършени изпитвания на твърдостта. Чрез използване на ИКТ методи и техники могат да се постигнат по-добри резултати при изследването на свойствата на материалите [210], [211].

Изпитването по Рокуел (Rockwell hardness test) е широко използван метод за оценяване на твърдостта на материалите, при който се измерва постоянната дълбочина на отпечатъка, създаден от прониквателя под определено натоварване. Тестът по Рокуел

е емпиричен метод за определяне на твърдост, което означава, че резултатите се основават на експериментални наблюдения и измервания на дълбочината на отпечатъка, а не на изчисления от фундаменталните физични свойства на материала. Поради това е изключително важно стриктно да се спазват стандартизираните процедури, посочени в съответните нормативни документи, за да се гарантира сравнимостта и надеждността на резултатите.

Съществуват и други методи за изпитване на твърдост, като Бринел (Brinell) и Викерс (Vickers), които също дават информация за устойчивостта на материала срещу деформация, но предоставят различни числови стойности за един и същ материал поради различията в принципите на измерване [212].

Съществуват и специфични скали на Рокуел за меки пластмаси:

- HRE скалата се използва за пластмаси и прилага сферичен стоманен прониквател с диаметър 1/8 инча (3,175 mm) и общо натоварване 100 kgf.
- HRL скалата е подходяща за меки пластмаси и използва прониквател с диаметър 1/4 инча (6,35 mm) и натоварване 60 kgf.
- HRM скалата се прилага при меки до твърди пластмаси и полимери като найлон, полиетилен и полипропилен, с прониквател с диаметър 1/4 инча (6,35 mm) и натоварване 10 kgf или 100 kgf, в зависимост от варианта.
- HRR скалата е предназначена за твърди пластмаси и композити като поликарбонат, с прониквател с диаметър 1/2 инча (12,7 mm) и натоварване 60 kgf.

За много меки пластмаси и еластомери често се предпочита твърдостта по Шор (Shore hardness) пред Рокуел. При изпитване на меки материали се използват сферични стоманени проникватели с различни диаметри (1/16", 1/8", 1/4", 1/2"). Общите приложени сили варират според избраната скала — 15, 30, 45, 60, 100 или 150 kgf. Предварителното натоварване е 10 kgf за стандартните скали и 3 kgf за повърхностните скали. Комбинацията от прониквател и изпитвателна сила определя конкретната скала на Рокуел.

Изборът на правилната скала е от решаващо значение за получаване на точни и надеждни резултати при изпитване на меки материали. Неправилният избор може да доведе до прекомерно проникване на прониквателя или до отпечатък, твърде малък за точно измерване [213-215].

За изпитването на твърдостта на пробите е използван цифров универсален уред за измерване на твърдост, разгледан в глава 2 на настоящият труд (точка 2.2, фиг.2.4), способен да извършва тестове по методите на Бринел, Рокуел и Викерс. Уредът работи в диапазон на изпитвателната сила от 5 kgf до 187,5 kgf, използвайки затворен цикъл с високоточна товарна клетка за прецизно прилагане на натоварването без необходимост от физически тежести. Уредът отговаря на международните стандарти ISO 6508, ASTM E-18, ISO 6506, ASTM E10, ISO 6507 и ASTM E92, което гарантира надеждни и стандартизирани измервания на твърдостта в различните скали и диапазони (например 8–650 HBW, 20–100 HR, 8–2900 HV) [216].

В Таблица 3.2 са обобщени някои от най-често използваните скали на Рокуел за меки материали.

Таблица 3.2. Най-често използвани скали на Рокуел за меки материали

Скала на Рокуел	Материали	Индентор	Общо натоварване (kgf)	Приложение
HRB	Медни сплави, меки стомани, алуминиеви сплави, ковък чугун	Стоманена топка 1/16"	100	Универсално предназначение за меки метали
HRE	Чугун, алуминиеви и магнезиеви сплави, лагерни метали	Стоманена топка 1/8"	100	По-меки метали
HRL	Меки пластмаси, носещи метали	Стоманена топка 1/4"	60	Много меки материали
HRM	Меки до твърди пластмаси, полимери	Стоманена топка 1/4"	100	Пластмаси
HRR	Твърди пластмаси, композити	Стоманена топка 1/2"	60	По-твърди пластмаси
HR15T	Мека стомана, месинг, бронз, алуминиеви сплави (тънки листове)	Стоманена топка 1/16"	15	Повърхностно изпитване на тънки метали
HR30T	Мека стомана, месинг, бронз, алуминиеви сплави (тънки листове)	Стоманена топка 1/16"	30	Повърхностно изпитване на тънки метали
HR45T	Мека стомана, месинг, бронз, алуминиеви сплави (тънки листове)	Стоманена топка 1/16"	45	Повърхностно изпитване на тънки метали
HR15X	Меки метали, пластмаси	Стоманена топка 1/4"	15	Повърхностно изпитване на меки материали
HR30X	Меки метали, пластмаси	Стоманена топка 1/4"	30	Повърхностно изпитване на меки материали
HR45X	Меки метали, пластмаси	Стоманена топка 1/4"	45	Повърхностно изпитване на меки материали

➤ *Калибрация и проверки преди изпитване:*

1) Калибриране на твърдомера

Проверява се калибрирането на натоварване и индентера с подходящи сертифицирани референтни блокчета (стоманени/никелови/полимерни). Уверяваме се, че машината работи в затворен цикъл с правилно функционираща товарна клетка.

2) Калибриране на оптичната система / камерата

Поставя се сценичен микрометър и се прави калибровка на измерния софтуер (пиксели → μm) за използваните обективи (10 $\times$, 20 $\times$, 50 $\times$ и т.н.). Записва се коефициента ($\mu\text{m}/\text{px}$) за всеки обектив/камерен режим.

➤ *Избор на метод и параметри:*

- Метод: Rockwell.
- Избран индентор: HRR/60/12.7.

➤ *Изпълнение на изпитването:*

Преди началото на измерванията беше извършена настройка на уреда EBP BRV-187.5T. Избран бе режим Rockwell, като изпитвателната сила беше зададена на $F = 60\text{kgf}$, а времето на натоварване - 1 s. Преди започване на измерването работната зона беше

обезвибрена, а позицията на пробата - нивелирана хоризонтално, за да се гарантира равномерно натоварване по време на индентирание.

За проверка на коректността на настройките бяха извършени пробни индентации върху калибриран референтен блок, след което измерените диагонали и изчислените стойности на твърдостта бяха сравнени с номиналните. След потвърждаване на точността, пробите бяха позиционирани прецизно върху механичната платформа.

Изпитванията бяха проведени по предварително изготвена схема на индентации. За всяка измервателна точка бяха записани код на пробата, точна позиция на индентирание, приложено натоварване, време на задържане, дата и час на измерването, температура и влажност в лабораторията.

Непосредствено след оформянето на всеки отпечатък бяха извършени микроскопски наблюдения с помощта на Olympus BX53M, като изображенията бяха заснети чрез цифровата камера DP23. Всички изображения бяха запазени във висока резолюция, с обозначено увеличение и калибрирана измервателна скала, осигурена чрез сценичен микрометър.

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:

Контактната сила, която се съпротивлява на плъзгащото се движение на обекти или на обект и повърхност, е известна като кинетично триене. Обикновено триенето при плъзгане е почти по-малко от статичното триене. Това улеснява преместването на обект, след като той е започнал да се движи, вместо да накара обекта да започне да се движи от статична позиция [217-221].

Силата на кинетичното триене се определя от:

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

Където:

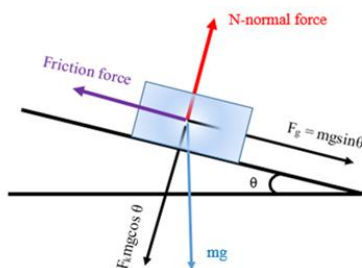
F_k е силата на кинетичното триене;

μ_k е коефициентът на кинетично триене;

N е нормалната сила.

Когато външна сила е приложена към блок, неговото ускорение върху наклонена повърхност се определя чрез сравняването му с кинетичната сила на триене, действаща върху блока. Блокът ще се ускори надолу, ако външната сила е по-голяма от силата на триене; блокът ще се забави и в крайна сметка ще спре, ако силата на триене е по-голяма. Тези действия са в съответствие с първия закон за движението на Нютон, който гласи, че даден обект ще се ускори, ако върху него действа ненулева обща сила. Блокът ще поддържа постоянна скорост и ще продължи да се движи надолу по наклонената равнина без ускорение в случаите, когато няма обща сила, като например когато кинетичната сила

на триене е равна на външната сила. Горните принципи могат да бъдат схематично описани чрез диаграмата на свободното тяло, показана на фигура 3.7.



Фигура 3.7 Диаграма на свободно тяло на блок, подложен на триене, докато се плъзга по наклонена повърхност [222]

Компонентът на гравитацията по посока на наклона се дава от:

$$F_g = mgsin\theta \quad (3.2)$$

Където:

- m е масата на блока,
- g е гравитационното ускорение,
- θ е ъгълът на наклона.

Нормалната сила (перпендикулярна на повърхността) се дава от:

$$N = mgcos\theta \quad (3.3)$$

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

$$F_k = \mu k \cdot mgcos\theta \quad (3.4)$$

За да се изчисли коефициента на кинетично триене върху наклонена равнина, трябва да се установи точката, в която успоредната сила, упражнена върху блока, е еквивалентна на перпендикулярната сила. Това се случва, когато блокът е под фиксиран ъгъл θ и се движи с постоянна постоянна скорост:

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

$$F_k = F_g \text{ or } \mu k mgcos\theta = mgsin\theta \quad (3.6)$$

От горните уравнения следва:

$$\Sigma \mu k = mgsin\theta / mgcos\theta = \tan\theta \quad (3.7)$$

Където θ е ъгълът, под който блокът започва да се движи с постоянна скорост [221].

2) Триене при търкаляне

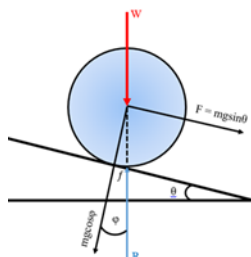
Триенето при търкаляне или така нареченото съпротивление при търкаляне се получава, когато по повърхността на даден обект се движи, той неизбежно среща съпротивление, което възпрепятства неговото движение. Триенето при търкаляне се получава поради кинетичното триене, което е специфично за точката, в която обектът и повърхността влизат в контакт. Теглото, грапавостта и факторите на еластичност могат да причинят както обекта, така и повърхността да се деформират, генерирайки силата на триене при търкаляне [223].

Триенето при търкаляне върху наклонена повърхност е показано на фигура 3.8. Когато топката е върху наклонена повърхност, нормалната сила варира в зависимост от косинуса на ъгъла между масата и посоката, перпендикулярна на повърхността, както е записано във 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 [215]

3) Коефициент на възстановяване

За да се изследва влиянието на триенето и възстановяването (restitution coefficient) при взаимодействие, се разработва експериментална методика, базирана на изпитвания с 3D принтирани образци и метод на свободно падане. Целта е да се определи коефициентът на реституция, който е основен параметър за коректно моделиране на взаимодействието между телата в лабораторни и индустриални условия.

Един от методите за определяне на коефициента на възстановяване е чрез височини при свободно падане на сфера, като се измерва височината от която пада, както и височината на отскока от повърхността, с която сферата има контакт. Друг метод е чрез определяне на скорост, като съотношението на скоростта след удар към скоростта скорост преди удара. Изследвания показват, че определянето на коефициента според тези методи е съпоставимо [217].

Загубите на енергия по време на тези сблъсъци са важни за правилното моделиране и симулиране на динамиката на процесите в топковите мелници.

За верифициране на моделирането и симулирането на коефициент на реституция са използвани данни от опитно определен коефициент на реституция. Коефициента е определен, като са отчетени височините преди и след удар. Сфера, свободно падаща е пусната от височина 650 mm. Сферата пада върху повърхност, след което с помощта на високоскоростна камера NAC MEMRECAM HX-6 [217] е записан отскока.

Методиката включва следните етапи:

1. Избор и подготовка на образци – чрез адитивни технологии се изработват сфери с диаметър 9 mm от различни материали (HIPS, TPU, PLA, PETG, Carbon, Vero white и др.). За сравнение се използва и стоманена сфера като референтен материал. Към всяка сфера се изработват и съпоставими по размер плочи (120 × 60 × 10 mm), също произведени чрез 3D печат.
2. Експериментална постановка – сферите се пускат от височина $H = 650$ mm чрез вертикална тръба, гарантираща контролирано направление на падането. Ударът се

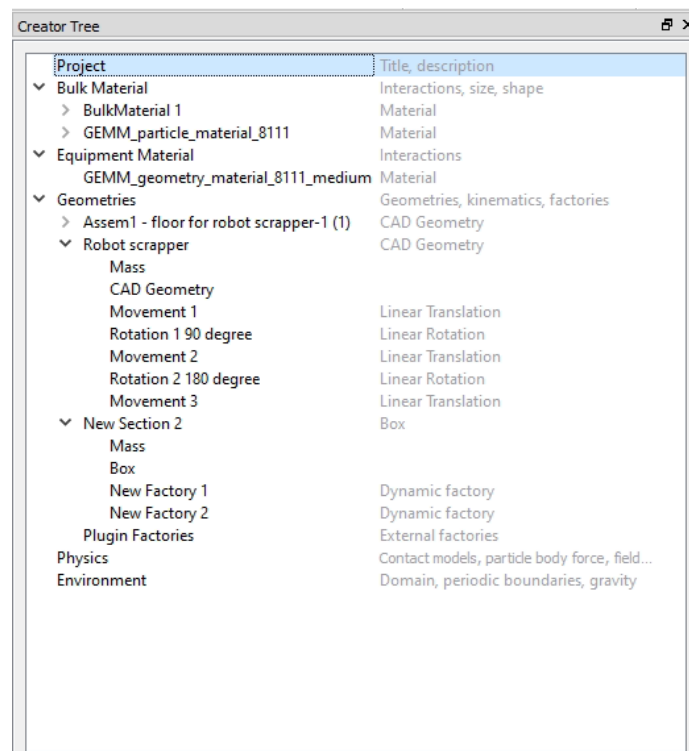
осъществява върху хоризонтално разположени плочи от различни материали. За регистрация на процеса се използва високоскоростна камера NAC MEMRECAM NX-6 с честота на кадрите 500 fps, а обработката на данните се извършва със софтуер Vicasso 2009.

3. Измерване на параметрите – определя се височината на отскока h след първия удар и се изчислява коефициентът на реституция e по формула (1): където H е височината на пускане, а h е регистрираната височина на отскок.
4. Повтаряемост и усредняване – за всяка комбинация сфера–плоча се извършват три повторения, като се отчита средната стойност на коефициента на реституция. Това позволява редуциране на експерименталните грешки и гарантира достоверност на резултатите.
5. Обработка и анализ на резултатите – резултатите се представят в табличен вид (глава 4, точка 4.1.3. от дисертационния труд), което улеснява сравняването на различните материали. Изведени са зависимости между структурата на материала, плътността и еластичността му.
6. Приложимост на методиката – чрез определените стойности на коефициента на реституция се задават входни параметри за симулации на движението на шлифовъчни тела в лабораторни и индустриални мелници. Това позволява моделиране на ключови процеси като разделителен ъгъл (shoulder angle), ъгъл на падане (toe angle), критична скорост на въртене и енергоефективност на процеса.

Разработената методика е приложима както за оценка на нови материали, получени чрез адитивни технологии, така и за оптимизация на симулационни модели. По този начин се постига възможност за по-прецизно прогнозиране на поведението на мелниците и оптимизация на енергийните разходи при реални производствени условия.

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. Задава се материала на частиците (Bulk material), който ще бъде изследван. В заданието на материала се включват параметри като коефициенти на триене, триене при търкаляне, реституция, плътност на материала, размер и др. Следващата стъпка е създаване на материал за използваното оборудване – Equipment material. В секцията Geometries има възможност за създаване на геометрия от самият софтуер, както и вмъкване на вече съществуващи CAD (Computer-Aided Design) модели [192-197]. Определят се действия на CAD моделите като линейна трансляция и/или ротация, скорост, ускорение, време на действие. Следващата стъпка е създаване на Factory, което генерира частиците за изследване с предварително зададените свойства. В тази част се задава количеството на желаните частици. Количеството може да бъде в общ брой, обща маса или без лимит. Други параметри при генерирането на частиците са време, за което да се произведат, време, в което да започнат да се генерират от софтуера, ограничения, контакт и др. Избран е най-разпространеният модел за контакт на симулации - hertz-mindlin contact model.



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 образци, позициониране на геометрия, създаване на трасе и анализ на получените данни от симулационното моделиране.

Спецификата на този софтуер е, че работи със сфери. За всяка сфера се изчислява скорост, ускорение, сили, маса и др.

Преди започване на симулирането, в софтуерния продукт е необходимо да се зададат входни параметри за частици (играещи ролята на сфера) и материал на оборудване – плочка.

При материала на частиците се задават входни параметри: размери, плътност, обем, маса, коефициент на възстановяване, коефициент на статично триене, коефициент на триене при търкаляне и др.

➤ **Изследване на Easy Fil HIPS и TPU материали за 3D печат със софтуер EDEM**

За да се симулира експериментът, предназначен за определяне на коефициента на възстановяване, е необходимо да се установи плътността на използваните проби (сфери с диаметър 9 mm и плочи с размери - 60x60x10), създадени с помощта на технологии за 3D печат. Средната плътност на масата ρ на едно тяло се определя като съотношението на неговата маса (m) към обема, зает от него (V). За да се определи обемът на плочите, е необходимо да се използва формулата за обем на паралелепипед.

За да се създаде симулационен модел, беше използван софтуерът за метод на дискретни елементи EDEM. Използван е методът на изчисление Hertz-Mindlin (без приплъзване). Входните данни за свойствата на материала, включително плътност, маса и коефициенти, бяха получени чрез експериментални средства.

Целта на това проучване беше да се проверят получените лабораторни експериментални резултати, за да се улесни използването на тези открития в по-точни и калибрирани симулации на топкова мелница в бъдеще. Данните ще улеснят повишаването на прецизността при оценката на основните променливи, включително ъгъл на разделяне, ъгъл на падане и идентифициране на отделни режими на работа в топкови мелници със и без повдигачи.

3.5. Заключение

Трибологичните свойства на 3D принтирани полимери все още се нуждаят от допълнителни подобрения и изследвания, особено по отношение на оптимизирането на производствените параметри и приложенията на такива материали в различни индустрии, включително автомобилната, авиационната, медицинската и строителната.

На базата на проведените изследвания, може да се заключи, че 3D принтираните полимери имат потенциал за приложение в разнообразни области, като предстои допълнително развитие и оптимизация на технологиите и материалите, за да се постигнат по-добри трибологични характеристики и широк спектър от приложения.

В настоящата глава бяха представени, обосновани и систематизирани методиките, използвани при провеждането на експерименталните изследвания върху 3D отпечатани полимерни и композитни материали. Разработените подходи осигуряват последователност, възпроизводимост и висока степен на надеждност на получените експериментални данни, като позволяват комплексна оценка на трибологичните и механичните характеристики на изследваните образци.

Предложената методика за 3D принтиране създава основата за контролирано производство на проби с висока геометрична точност и структурна еднородност, което е ключов фактор за постигане на достоверни резултати при последващите анализи. Методиката за анализ на микротвърдостта гарантира възможност за прецизна оценка на локалните механични свойства на материалите, като чрез комбинираното приложение на измерване по Бринел и по Шор се постига пълна характеристика на твърдостта на полимерните и композитните образци.

Разработената методика за изследване на трибологични свойства позволява определяне на основните параметри, характеризиращи поведението на материалите при контактно взаимодействие — коефициенти на триене при плъзгане, при търкаляне и на възстановяване. Получените чрез нея данни създават надеждна база за сравнение и валидиране на резултатите от симулационните модели.

Методиката за симулационно моделиране в среда на EDEM Software представлява съвременен инструмент за виртуално изследване и анализ на поведението на материалите при различни условия на натоварване. Тя допълва експерименталните изследвания, като позволява извършване на числени експерименти, прогнозиране на резултати и оптимизация на технологичните параметри.

Обобщено, изградените и приложени методики формират интегрирана експериментално-аналитична система, която осигурява съпоставимост между експериментални и симулационни резултати. Те създават методологична основа за последващите етапи на дисертационния труд — анализ на резултатите, тяхната интерпретация и формулиране на научни изводи, свързани с оптимизирането на технологичните процеси при изработване и приложение на 3D отпечатани полимерни и композитни материали.

Глава 4.

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

Настоящата глава представя и анализира резултатите от експерименталните изследвания, проведени върху 3D отпечатани полимерни и композитни материали с различна геометрия на пробите – плочки, плоски плочки, цилиндрични и сферични образци. Основната цел на тези експерименти е да се оцени влиянието на геометрията, технологичните параметри на отпечатване и материалния състав върху трибологичните и механичните характеристики на изследваните образци.

В рамките на проведените изследвания са определени основни трибологични параметри, включително коефициентът на триене при плъзгане, коефициентът на триене при търкаляне, както и коефициентът на възстановяване на еластичността след деформация. Чрез тези показатели се извършва комплексна оценка на поведението на материалите при контактно натоварване и относително движение между повърхностите.

Паралелно с трибологичните тестове са проведени и измервания на микротвърдостта на 3D отпечатаните образци, извършени с твърдомер EBP BRV-187.5T, което позволява прецизна оценка на локалната механична устойчивост на материала. Допълнителен анализ на микроструктурата и повърхностните характеристики е осъществен чрез металографски микроскоп Olympus BX53M, оборудван с цифрова камера Olympus DP23, което дава възможност за визуална и количествена оценка на морфологичните особености, дефектите на структурата и хомогенността на материалите.

Получените експериментални резултати служат като основа за по-нататъшен анализ на връзката между производствените параметри на 3D печата, структурата на материала и функционалните му характеристики. Тези данни допринасят за оптимизиране на технологичните процеси и за разработване на нови подходи при проектирането на функционални полимерни и композитни материали, произведени чрез адитивни технологии.

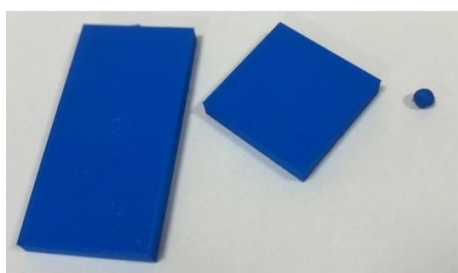
4.1. Резултати от изследваните коефициентите на триене на 3D отпечатани проби

В рамките на проведените експериментални изследвания, насочени към анализ на механичните и трибологичните свойства на полимерни и композитни материали, получени чрез технологията на триизмерния печат (3D печат), бяха проучени и сравнени образци, изготвени от различни видове материали. Изследванията са проведени по методиките, описани в глава 3 на настоящия дисертационен труд, като е осигурена съпоставимост на условията на натоварване и на експерименталната постановка.

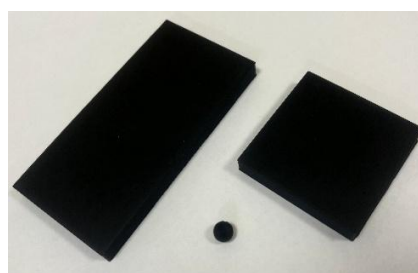
В следващите страници са представени и анализирани получените експериментални резултати за основните трибологични характеристики, а именно: коефициент на триене

при плъзгане, коефициент на триене при търкаляне, както и коефициент на възстановяване на еластичната деформация след контактното натоварване. Тези параметри са от съществено значение за оценката на функционалното поведение на материалите при реални експлоатационни условия, където взаимодействието между контактните повърхности определя устойчивостта на износване и енергийните загуби при триене.

За целите на експерименталната работа бяха изготвени изпитвателни образци чрез 3D печат, използвайки параметри, осигуряващи висока повтораемост на геометрията и хомогенност на структурата. На Фигура 4.1 са представени изображения на изследваните проби, изработени от материал HIPS (High Impact Polystyrene), а на Фигура 4.2 – съответните образци, получени от еластомерен материал TPU (Thermoplastic Polyurethane).



Фигура 4.1 *Проби за изследване на HIPS*



Фигура 4.2 *Проби за изследване на TPU*

Представени са резултати от извършени изследвания на трибологичните процеси на материала EasyFil HIPS (Dark Blue), използван при 3D принтиране. Допълнително беше направен сравнителен анализ с резултати от други експерименти, проведени от колектива с различни видове филаменти [224, 225].

Изследвано е взаимодействието на EasyFil HIPS с различни широко използвани материали за 3D печат – PLA, PETG, CARBON, Steel Fil, TPU, Flex и Vero White. Оценени са характеристиките на взаимодействието при триене при плъзгане, триене при търкаляне и реституция, с цел установяване на различията в поведението на материалите и тяхното значение за практическото им приложение [225].

Изследвани са два вида 3D принтирани материали (TPU и HIPS) и техните трибологични свойства по отношение на коефициента на триене при плъзгане, коефициента на триене при търкаляне и коефициента на възстановяване. Параметрите са измерени експериментално при лабораторни условия и са сравнени с данни за други 3D принтирани материали. След провеждане на експериментите са създадени симулационни модели за верификация на получените резултати. Събраните данни ще бъдат използвани за разработване на модели, описващи взаимодействието между мелещите тела и средата на смилане, с цел повишаване точността на симулациите.

4.1.1 Коефициент на триене при плъзгане

В настоящата глава са представени резултатите, получени в хода на експерименталните изследвания, проведени съгласно описаната в Глава 3 методика. Целта е да се анализира влиянието на различните параметри върху стойностите на измерените величини между различните видове полимери и композити получени чрез 3D печат.

Първоначално са обработени данните, получени при изпитванията на кинетичното триене, като изчисленията са извършени по формулите (3.1)–(3.7), представени в предходната глава. Получените стойности на коефициента на кинетично триене за различните наклони и повърхности са обобщени в табличен вид, показващи зависимостта между ъгъла на наклона и движението на блока.

Фигура 4.3. представя шест измервания, извършени по време на експериментите 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 (Hips+материал)	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

Материал (Hips+материал)	Ъгъл на триене , θ°	Ъгъл на триене , θ rad	Коефициент на триене при плъзгане, $\text{tg } \theta^\circ$
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

Материал (TPU+материал и)	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

Материал (TPU+материал и)	Ъгъл на триене , θ°	Ъгъл на триене , θ rad	Коефициент на триене при плъзгане, $\text{tg } \theta^\circ$
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. Изследванията са проведени съгласно методиката, описана в Глава 3, като целта е да се оцени влиянието на различни фактори – като ъгъл на наклона, материал на повърхността и маса на търкалящото се тяло – върху стойностите на коефициента на триене.

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

В хода на изследването се поставиха (9mm) сфери от 6 различни материала върху повърхността на плочка (120x60x10) EasyFil HIPS. 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+ 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

Коефициентът на възстановяване (реституция) се използва при характеризирание на скоростта на разсейване на енергията, включващи сблъсъци на повърхности, най-често със сфери. Предизвикателството при измерването на коефициента на възстановяване е влиянието на фактори, наблюдавано в експерименталните данни, което е резултат от различни свойства на обектите, форма и грапавост на повърхността, както и от несъвършенства в експерименталната техника. Коефициентът на възстановяване зависи от много елементи, като геометрията на телата в контакт, скоростта на приближаване, свойствата на материала, продължителността на контакта и евентуално триенето. Коефициентът на възстановяване е често срещан и популярен параметър, използван в много модели на сблъсък, особено за сблъсък без триене поради неговата простота и обикновено се прилага като постоянни стойности между нули до единица.

С помощта на софтуерен продукт Vicaso 2009 са отчетени височините. Софтуерът позволява възпроизвеждане на единичен видеоклип, с точен достъп до всяка част от видеото чрез лента за проследяване или бутони за единичен кадър. Самото изображение може да се увеличава или намалява. Поддържа сравнение на няколко видеоклипа. Богат набор от инструменти за обработка на изображения позволява на изображението да бъде подобро, за да се премахне шума или да се увеличи контраста, така че да могат да бъдат разкрити специфични детайли. Тези подобрения могат да бъдат приложени към целия видео поток, така че тези функции да могат да бъдат следвани във видео и подобреното видео да бъде запазено във файл. По-нататъшният анализ на изображението се подпомага от редица инструменти за калибриране и измерване, включително предоставянето на решетки и линии за калибриране и измерване. Друга предоставена ценна функция е анотацията на видео изображението, било то с текст, решетки, линии и информация за времето или лога, което помага за персонализиране на видеото.

Сферата на HIPS, която е 9 mm, пада върху плоча на HIPS с размери 60x60x10 mm, след което отскокът се записва с помощта на високоскоростна камера NAC MEMRECAM NH-6. По същия начин се извършват и експериментите за взаимодействие с останалите материали, показано на фиг.4.7, където сфери (9 mm) от тях падат над плочка HIPS(60x60x10 mm).

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 [225]:

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

Където:

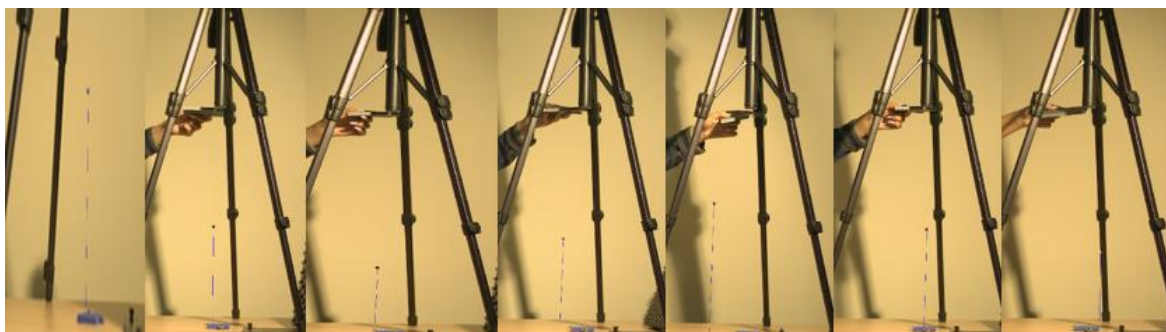
e - коефициент на възстановяване;

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

Чрез развитието на 3D технологиите и използването на разнообразни материали за адитивно производство се създават нови възможности за подобряване на качеството на живот на хора с нарушено зрение и слепота. Съвременните методи позволяват изработването на културно-исторически обекти, брайлови надписи и образователни модели с висока тактилна пригодност [226]. В изследване бяха проучени трибологичните фактори (грапавост, устойчивост на повърхността, височина на слоя) на различни 3D принтирани материали – PLA и Visijet PXL Core – с цел определяне на тяхната роля за тактилната устойчивост и възприятие. В изследването участват две групи – хора със зрителни увреждания и хора, родени слепи. Резултатите показват, че резолюцията на печат, ширината на контурите и последващата обработка влияят съществено върху трибологичните свойства и лекотата на разпознаване на обектите. Най-добро тактилно възприятие е отчетено при обекти, принтирани с PLA на висока резолюция (0.06 mm), както и при контурни релефи с ширина около 1 mm. Брайловите надписи, съответстващи на определен размер от стандартните шрифтове, се възприемат най-лесно от редовните читатели. Изследването акцентира върху значимостта на трибологичните характеристики при проектирането и изработването на 3D принтирани тактилни средства, предназначени за обучение, пространствена ориентация и културно приобщаване на хората с нарушено зрение. Разработените модели са създадени и внедрени в Софийския университет „Св. Климент Охридски“ [227].

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, Изида) 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.

Изследва се тактилната пригодност на 3D отпечатани материали за хора с увредено зрение. 3D отпечатаните материали са произведени с два различни принтера, работещи с технологии FDM и ColorJet. Използваният материал за FDM технологията е PLA, а за ColorJet технологията е гипсов материал, който е обработен с различни етапи на финално покритие. С помощта на споменатите 3D отпечатани материали се отпечатват различни модели на животни, египетски символи, автомобили, брайлова азбука, отвертки и др. За постигане на целите и задачите на изследването, група от 5 слепи и 4 хора с увредено зрение бяха изследвани чрез докосване на предварително зададените 3D отпечатани тестови модели.

За да се изследва тактилната пригодност на детайли от 3D обекти, бяха произведени няколко такива: Древноегипетската богиня Изида (фиг. 4.8 а), Сфинкс (фиг. 4.8 б), азбуката на Брайл на български език (фиг. 4.8 в), животинска форма — бухал (фиг. 4.8 г), кубът на Рубик (фиг. 4.8 д), прасе, теле и крава (фиг. 4.8 е), автомобил (фиг. 4.8 ж), глобус с релефни континенти, учебен материал за човешката отделителна система, морски шах, къща и други — всички те са произведени като 3D модели с различни технологии за 3D принтиране.

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 с технология FDM според препоръките на производителя: запълване на детайлите 20%, 3 външни стени, температура на леглото 60 °C, температура на дюзата 215 °C, скорост на печат 60 mm/s, а височината на слоя е настроена на две различни резолюции — 0,06 mm и 0,2 mm. За детайлите: Древноегипетската богиня Изида (фиг. 4.8 а), азбуката на Брайл (фиг. 4.8 в), прасе (фиг. 4.8 е), глобус с релефни континенти, учебен материал за човешката отделителна система, морски шах, кубът на Рубик (фиг. 4.8 д), къща (фиг. 4.9) — е използвана резолюция 0,06 mm.

За останалите — Сфинкс (фиг. 4.8 б), бухал (фиг. 4.8 г), теле и крава (фиг. 4.8 е) — е използвана резолюция 0,2 mm.

3D принтираният обект, показан на фиг. 4.8 ж), е изработен в шест различни варианта и е обработен по различни начини. Методът на печат изисква като финална операция покриване с Color Bond™ 30, след което лакът се попива с хартия. Покритието се нанася еднократно, но в този конкретен случай е нанесено 6 пъти за шестте модела: Количка 1 – 2 покрития, Количка 2 – 3 покрития, Количка 3 – 4 покрития, Количка 4 – 5 покрития, Количка 5 – 6 покрития, Количка 6 е обработена и оставена да изсъхне без наkisване.

В изследването участват две групи млади хора с нарушено зрение — едната група включва хора с прогресивна загуба на зрение през годините, а другата — хора, родени незрящи. Част от участниците са завършили специално училище за хора със зрителни увреждания, а други са били включени в масовото образование.

Когато детайлите са представени на групата хора с нарушено зрение, част от тях са описани, част не са, а на трета част са дадени умишлено грешни инструкции с цел разпознаването им.



а)

б)



в)



г)



д)



е)



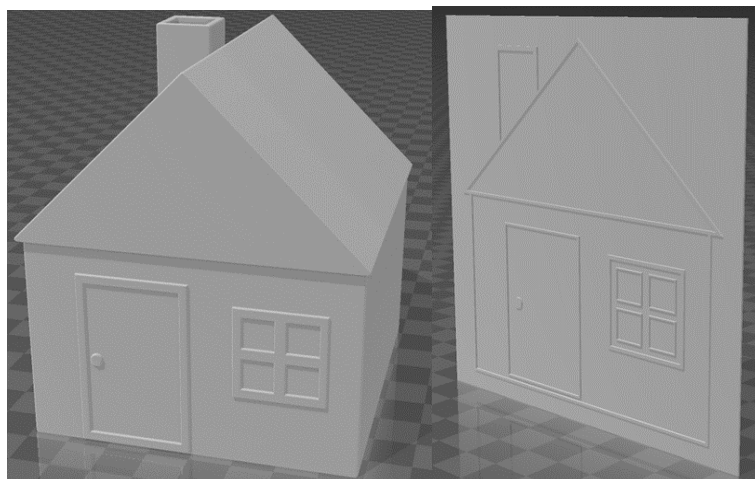
ж)

Фигура 4.8. 3D принтирани образци

Предишни изследвания на екипа, 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).

Целта на изследването е била да се акцентира върху тактилната обратна връзка, устойчивостта и възприятието на участниците в проучването. 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 Modeled house

Целта на изследването е да се определи кои детайли, характеристики на печат, използвани шрифтове и дебелини на линиите са най-подходящи от тактилна гледна точка. За да се осигури добро тактилно усещане, обектите трябва да имат гладки повърхности, които да проявяват ниско съпротивление спрямо възникващите трибологични свойства между пръстите на хората и обектите, които се тестват за тактилна устойчивост.

Фигурите на Древноегипетската богиня Изиди (фиг. 4.8 а) и Сфинкса (фиг. 4.8 б) са били разпознати от участниците със зрителни увреждания. Напълно незрящите не са могли да ги свържат с египетски символи, тъй като те не са били предварително обсъждани и не са виждали подобни изображения в релеф.

Животинската фигура на бухал (фиг. 4.8 г) е била разпозната от хората със зрителни увреждания. Част от незрящите са успели да я познаят с помощта на словесни насоки — „мъдро животно“. Бухалът се характеризира с остри уши и малък размер. По-големият модел на бухал е определен като по-подходящ. Перушината и краката му са ясно различни, а фигурата е поставена върху пън.

Наблюдавана е разлика между тактилната повърхност на двата вида резолюция на FDM принтера, но тя не е била съществена. На фиг. 4.8 е са показани четири животински фигури с различна грапавост на повърхността и различни трибологични свойства по отношение на тактилната устойчивост. Животните, означени на фигурата като (1) и (4), са отпечатани с височина на слоя 0,2 mm. При животното (2) самият 3D модел е бил с по-ниска резолюция, което е допринесло за различна повърхност и различна тактилна чувствителност. Животно (3) е отпечатано с най-висока резолюция — 0,06 mm. Всички животни са били разпознати, като животното (3) е определено като най-гладко. При него

са използвани по-фини настройки на принтера. Някои дефекти са открити по долната част на фигурите, причинени от самата технология на печат, при която се добавя поддържащ материал, за да могат детайлите да бъдат отпечатани.

Подготвените 3D принтирани фигури от египетската култура — сфинкс и богиня Изида — не са били разпознати от незрящите участници. Някои от хората с намалено зрение са успели да ги идентифицират.

Буквите от азбуката на Брайл (фиг. 4.8 в) са били определени като добри и лесно разпознаваеми. Азбуката на Брайл е изработена в съответствие с размерите на тактилните помощни средства, използвани в учебния процес и образованието. За да се изследва тактилната пригодност, са направени и допълнителни размери, съответстващи различни шрифтове в MS Word.

От трибологична гледна точка, когато незрящите четат Брайл, се прилагат сили на триене и повърхностен контакт. По-малките размери изискват по-малка контактна повърхност с пръстите, докато по-големите размери изискват по-голяма контактна площ и по-голяма приложена сила за четене от точка до точка.

При тактилното изследване, показано на фиг. 4.8, най-подходящият шрифт за редовни читатели на Брайл е бил размерът, съответстващ на MS Word 18 pt. Шрифт 22 pt също е бил подходящ за четене. За хора, които не са чели Брайл дълго време, размери 20 и 22 pt са били определени като по-подходящи.



Фигура 4.10 3D принтиран Брайлов текст

4.2. Резултати от изследването на микротвърдостта на материалите

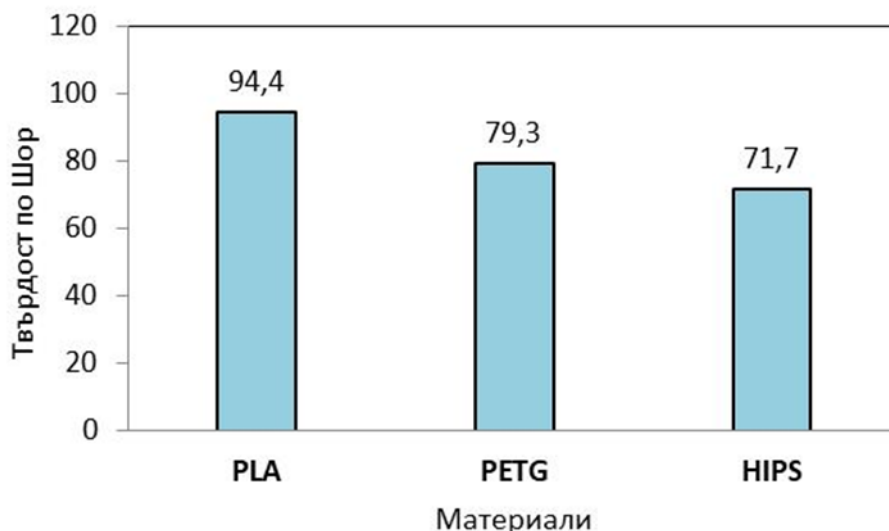
За измерването на микротвърдостта по шор бяха отпечатани плоски образци, след което бяха притиснати с твърдомер (Instruction Manual Digital Shore Hardness Tester SAUTER HD) на стенда. В таблица 4.6 са представени резултати за плътността и твърдостта по Шор на изпитваните материали като средно-аритметична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

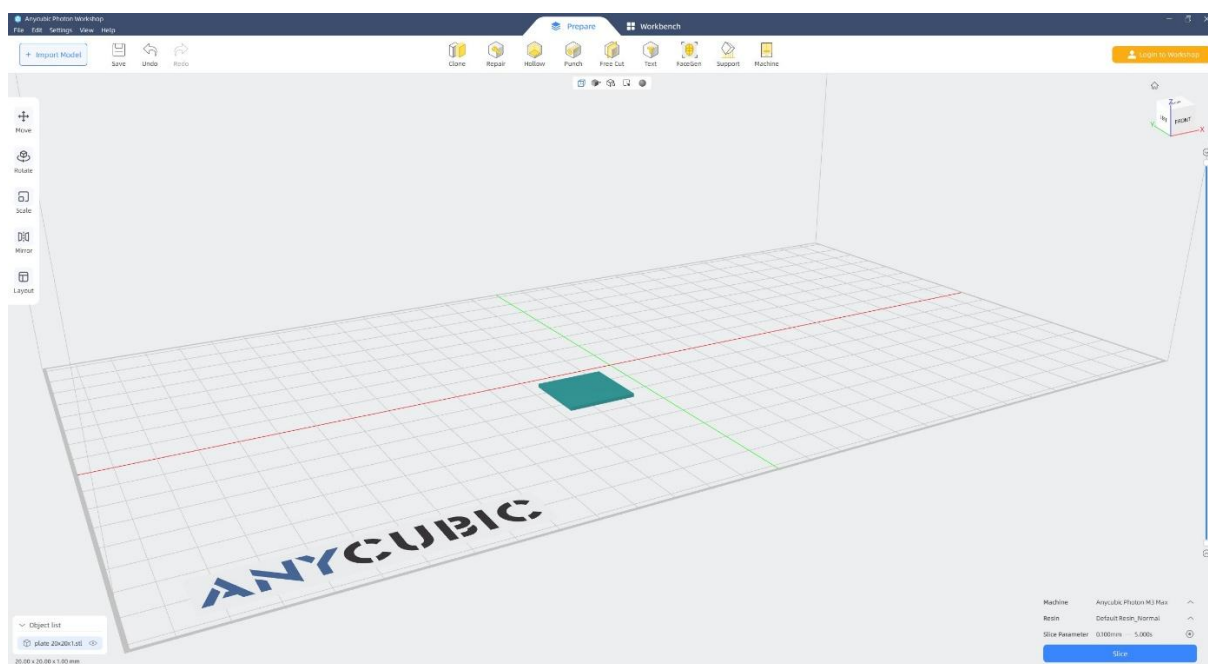


Фиг. 4.11 Диаграма на твърдостта на изпитваните материали

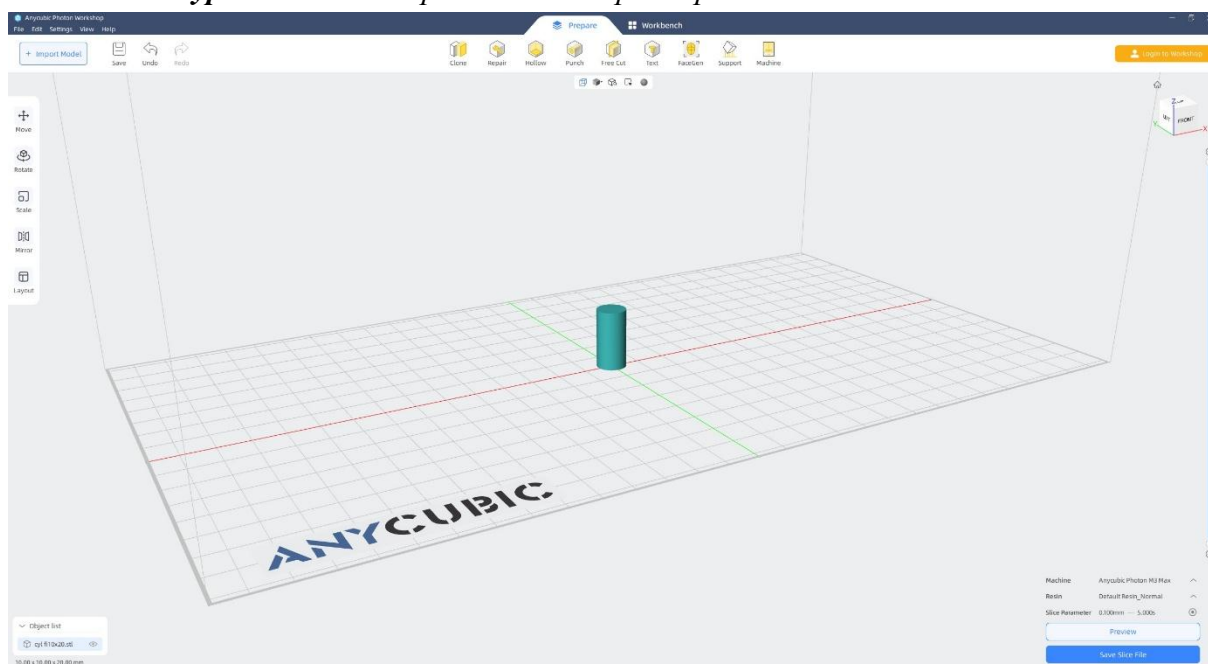
За целите на изследването на микротвърдостта с твърдомер EBP BRV-187.5T, бяха моделирани два вида изпитвателни образци, като процесът на проектиране беше извършен в софтуерната среда Anycubic Photon Workshop. Избраният софтуер позволява създаване на 3D модели, оптимизирани за фотополимерно 3D принтиране, като дава възможност за контрол върху геометричните параметри и ориентацията на обектите по време на отпечатване.

Бяха създадени два основни типа образци – плочки (Фиг. 4.12) и цилиндри (Фиг. 4.13), които се различават по форма и обем, с цел да се изследва влиянието на геометрията върху ефективността на UV обработката и получените стойности на твърдост. Плочките са с малка дебелина и сравнително равномерна повърхност, което ги прави подходящи за оценка на повърхностното втвърдяване. Цилиндричните образци, от своя страна, имат по-голям обем и различна геометрия, което позволява да се анализира ефектът на UV облъчването при по-масивни структури.

Моделираните обекти бяха подготвени с цел да се осигури сравнимост на резултатите, като са спазени еднакви параметри на принтиране и последваща обработка. Това позволява надеждна оценка на влиянието на формата и размерите върху механичните характеристики на получения материал.



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



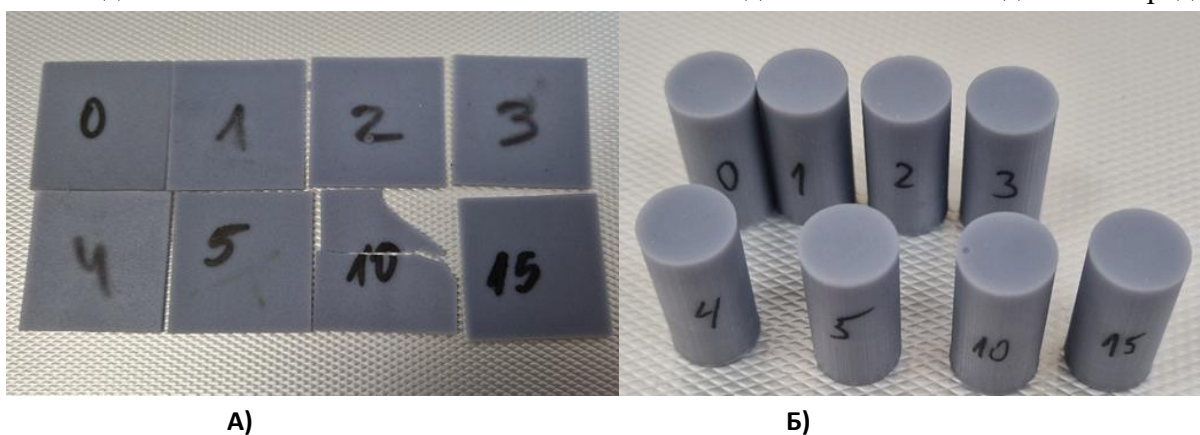
Фигура 4.13 Моделиран цилиндър с височина 20 мм и диаметър 10 мм

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

- 1) Първо, различните размери и форми на плочките и цилиндрите позволяват да се изследва и докаже влиянието на UV обработката върху повърхностната твърдост при обекти с различна дебелина и обем. Чрез сравнение на резултатите от изпитванията може ясно да се проследи ефектът от геометрията върху степента на втвърдяване на материала след облъчване.
- 2) Второ, тези форми са избрани с оглед на практическото им приложение при разработване на помощни средства за незрящи потребители. Плочките (Фиг. 4.14 а) са близки по форма и размер до използваните в практиката тактилни плочки, които служат за ориентиране и навигация. Цилиндричните образци (Фиг. 4.14 б), от своя

страна, могат да се използват при създаването на различни тактилни елементи и детайли, подпомагащи ориентирането и взаимодействието на хора с нарушено зрение [208].

Основната цел на проведените експерименти е да се постигне повишаване на повърхностната твърдост на тези елементи, което да осигури по-голяма износоустойчивост и дълготрайност при реална употреба. По-твърдата и устойчива повърхност е от съществено значение, тъй като тактилните плочки и помощни елементи са подложени на интензивно механично въздействие в ежедневна среда.



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

Описаният в глава 2 **твърдомер ЕВР BRV-187.5Т** 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 екрана на контролния панел на твърдомер ЕВР BRV-187.5Т по време на настройка на параметрите за изпитване на твърдост. На дисплея са въведени основни данни, включително номер на пробата, радиус на кривина, диапазон на

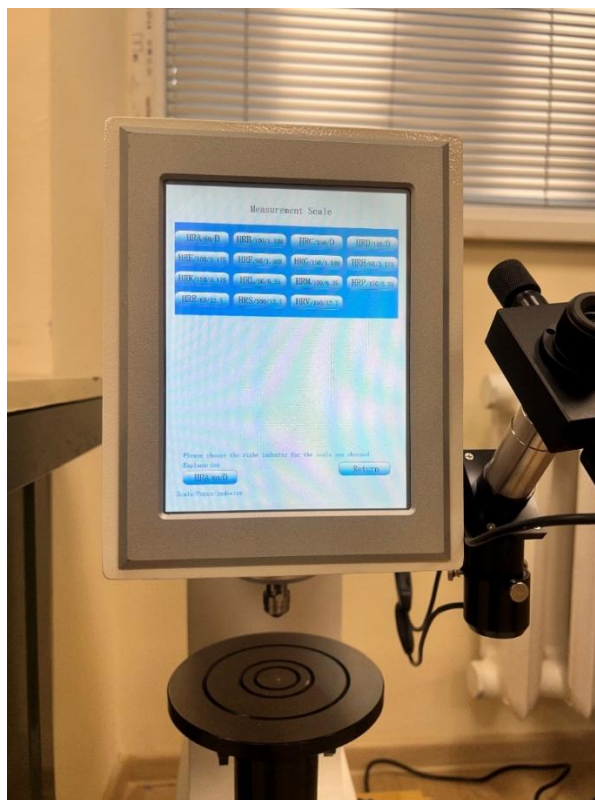
измерване, избрана скала за твърдост (Hardness type), вид на конверсията (Conversion type), време на задържане (Dwell Time) и други настройки, необходими за извършване на коректно измерване. След конфигуриране на параметрите, чрез бутона Start се инициира процесът на изпитване. Панелът предоставя удобен интерфейс за оператора, което позволява прецизен контрол върху измервателните условия и повишава точността и повторемостта на резултатите.



Фигура 4.16 Контролен панел на твърдомер EBP BRV-187.5T

На фигура 4.17 е показан изглед на използвания в изпитванията твърдомер EBP BRV-187.5T, оборудван с монтиран индентор, приложен за определяне на повърхностната твърдост на образците. Уредът разполага с цифров дисплей и интуитивен интерфейс за избор на подходящата скала за измерване, което позволява лесно конфигуриране според конкретните изисквания на изпитването. На екрана са визуализирани различните налични Rockwell скали (HRA, HRB, HRC и др.), като за провеждането на измерванията е подбрана съответната скала в зависимост от материала и геометрията на пробите.

Твърдомерът е снабден със стабилна опорна маса за позициониране на образците, както и с прецизен механизъм за прилагане на натоварването върху повърхността. Монтираният индентор е избран в съответствие с използваната измервателна скала, като осигурява точност и повторемост на резултатите. Този тип уреди позволяват извършване на бързи и надеждни измервания, което ги прави подходящи за лабораторни изследвания, свързани с определяне на механични свойства на различни материали.



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

В таблица 4.7 и фигура 4.18 са представени резултатите от проведеното изпитване на повърхностната твърдост на тънки плочки с размери $20 \times 20 \text{ mm}$ и дебелина 1 mm (Фиг. 4.14 а). Плочките са изработени чрез 3D принтер Anycubic, който използва фотополимерни смоли. След приключване на процеса на отпечатване, образците са подложени на последваща обработка посредством облъчване с ултравиолетова (UV) светлина. Целта на тази обработка е да се постигне допълнително втвърдяване на повърхностния слой, което е особено важно за приложения, при които е необходима по-висока устойчивост на износване и механични натоварвания.

Данните, представени в таблица 4.7, ясно показват тенденция към увеличаване на повърхностната твърдост с нарастване на времето на UV облъчване. В началните етапи на обработката (първите няколко минути) се наблюдава отчетливо повишаване на твърдостта, което се дължи на интензивното протичане на фотополимеризационните реакции в горния слой на материала. С удължаване на времето на експозиция процесът на втвърдяване постепенно достига своя максимум, като скоростта на нарастване на твърдостта намалява.

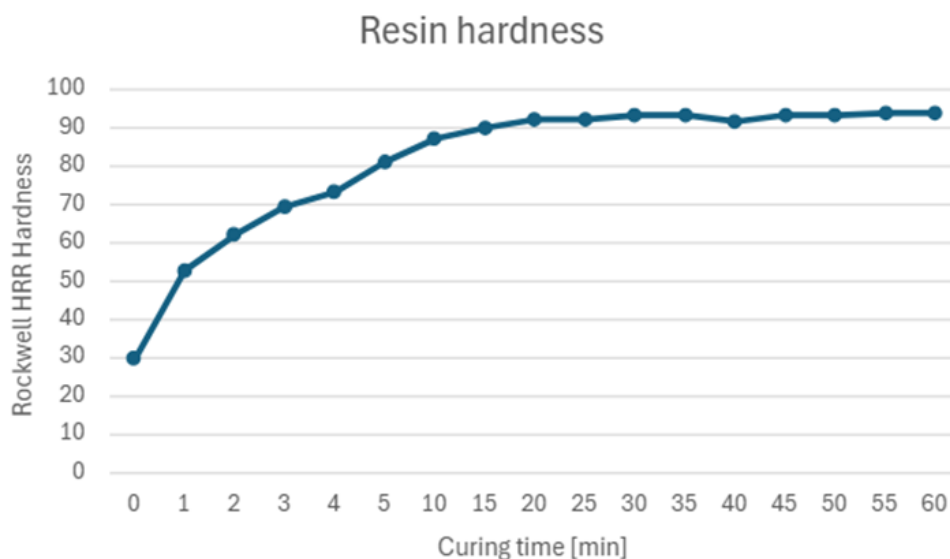
След петнадесетата минута на облъчване не се регистрира съществено допълнително повишаване на твърдостта. Това показва, че по-нататъшното увеличаване на времето на UV обработка не води до значителни промени в механичните свойства на повърхността. На базата на тези наблюдения може да се направи обоснован извод, че 15-минутната UV обработка е оптимална за постигане на максимална повърхностна твърдост на плочките. По-дългото облъчване би довело единствено до увеличаване на времето и енергийния

разход, без да се постигат допълнителни ползи по отношение на механичните характеристики.

Тези резултати са от практическо значение, тъй като определянето на оптималното време за UV обработка позволява оптимизация на производствения процес. Чрез правилно подбрана продължителност на експозицията може да се постигне баланс между качеството на крайния продукт и ефективността на производството, което е особено важно при серийно изработване на детайли с високи изисквания към повърхностните свойства.

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 мм и дебелина 1 мм от таблица 1, представено в графичен вид

При проведените изпитвания върху цилиндрични образци с височина 20 mm и диаметър 10 mm (Фиг. 4.14 б) се наблюдават съществени различия в получените резултати в сравнение с тези при плоските образци. В таблица 4.8 са представени числените данни от изпитванията, а на фигура 4.19 резултатите са илюстрирани в графичен вид, което позволява по-ясно проследяване на тенденциите.

За разлика от наблюдаваното при плочките, при цилиндричните образци дори при продължително UV облъчване не се отчита ясно изразено увеличение на повърхностната твърдост. Независимо от увеличаването на времето на експозиция, измерените стойности остават относително стабилни и не показват тенденция към значително нарастване.

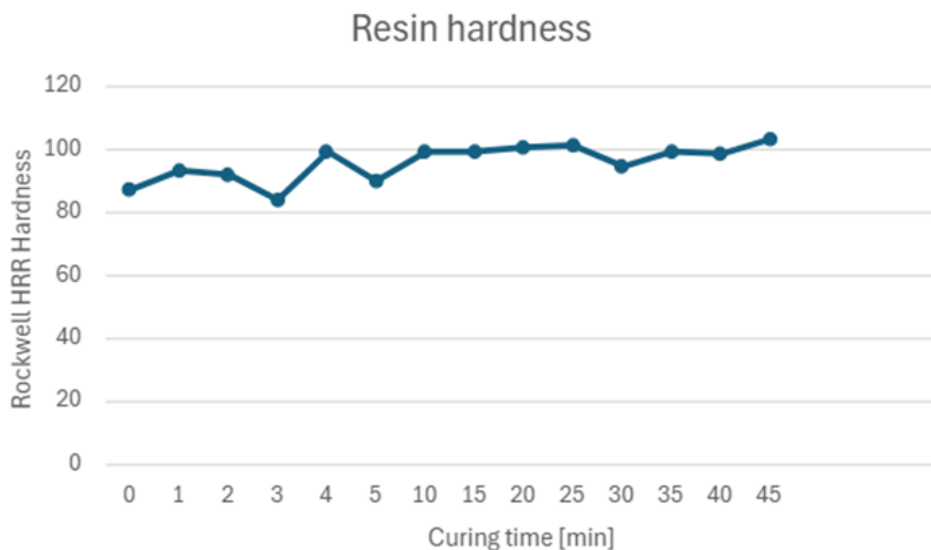
Това поведение може да бъде обяснено с по-големия обем на цилиндричните образци и спецификата на UV обработката, която въздейства основно върху повърхностния слой на материала. При по-дебели и масивни елементи проникването на UV лъчението в дълбочина е ограничено, поради което вътрешните слоеве остават с по-ниска степен на втвърдяване. В резултат общата твърдост на детайла не се повишава значително, тъй като измерванията отразяват комбинация между по-твърдата повърхност и по-меката вътрешна структура.

Тези резултати подчертават важността от съобразяване на геометрията и размерите на детайла при определяне на оптималните параметри на UV обработката. Докато при тънки плочки облъчването води до значително повишаване на повърхностната твърдост, при по-масивни елементи този ефект е ограничен. Това е ключов фактор при проектирането на технологични процеси за изделия с различна форма и дебелина, тъй като неправилно подбраните параметри могат да доведат до неравномерни механични свойства в различните зони на обекта.

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

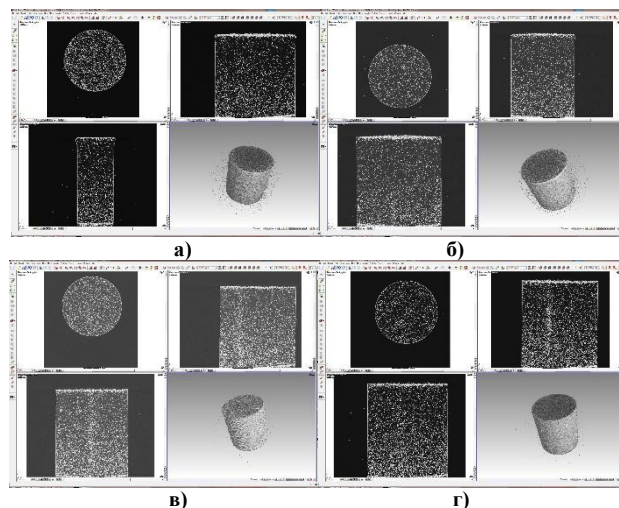


Фигура 4.19 Изпитване за твърдост на цилиндър с височина 20 мм и диаметър 10 мм, изработен от смола, представено в графична форма

Изпитването за твърдост по Рокуел на меки образци за изпитване е важен метод за определяне на механичните свойства на материалите. Правилният избор на мащаб, прецизната подготовка на образците и стриктното спазване на методиката и съответните стандарти са от съществено значение за получаване на надеждни и точни резултати. Интерпретацията на получените стойности трябва да се извършва внимателно, като се вземат предвид използваният мащаб и характеристиките на тествания материал.

Обработката с UV светлина за увеличаване на твърдостта на пробите от смола след печат е приложима само за части, при които се изисква увеличаване на повърхностната твърдост. За части, при които искаме да получим увеличение на твърдостта в дълбочина, трябва да се използва друг метод.

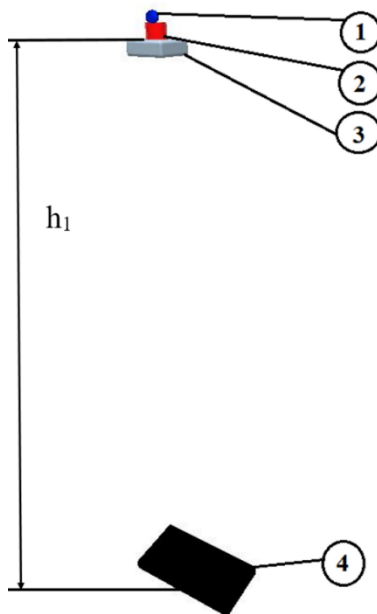
Образците бяха изследвани с разрез с дълбочина 0,05 мм, като наблюдението беше извършено с индустриален 3D компютърен томограф (СТ) Nikon XT-H 225. По време на изследването вътрешната структура показва еднородност, което означава, че втвърдяването на пробите не влияе върху вътрешната структура и плътността на образците. Бяха изследвани и външните стени, като не беше наблюдавана разлика в дебелината на слоевете. На фиг. 4.20 ясно се вижда еднородната структура на 3D отпечатаните смолни цилиндри.



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 максимално получената височина на отскока след контакт с плочата, получен в софтуера спрямо височината на отскока при опитното установяване на коефициента на реституция.

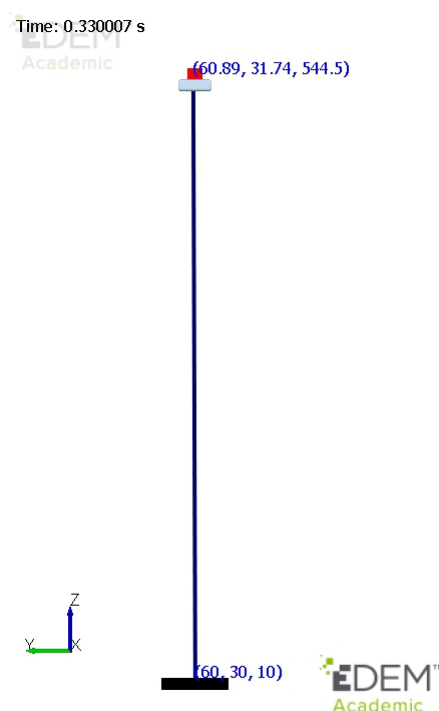
Софтуера има възможност за следене на сферата през цялото и движени, в координати XYZ. За начална точка на следенето е зададена сферата, а за крайна точка е зададена плочата.

При първоначалният момент, разстоянието между сферата и плочата е 544,5 mm, показано на фиг. 4.22. Разликата от 4,5 mm се дължи на факта, че софтуера взема центъра на сферата, която е с радиус 4.5 mm. При крайната точка за следене спрямо повърхност, ръчно е зададена горната повърхнина на плочата, описана в координатите $X = 60$ (средата от дължината 120 mm), $Y = 30$ (средата от ширината 60mm) и $Z = 10$ – височината на плочата, която е 10 mm.

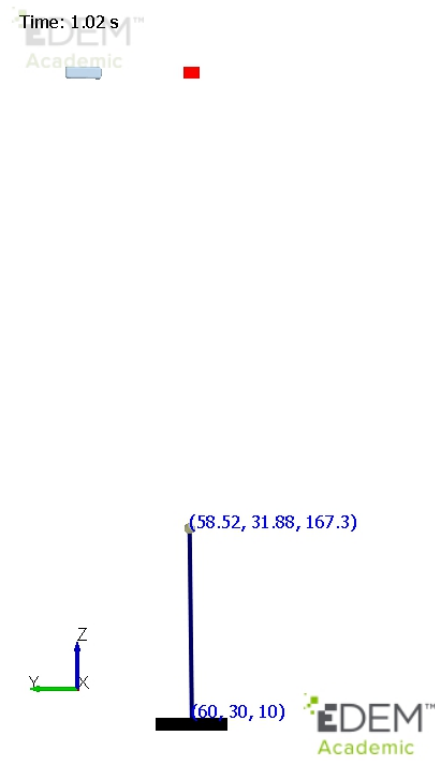
На фиг. 4.23 е показан моментът, в който сферата е на най-голямото разстояние от плочата, а именно 167,3 mm. В този момент сферата се намира в покой.

Допълнително, в софтуера е отчетена и скоростта на сферата, като в момента на отскока, преди отново да смени посоката скоростта е $=0$ m/s (фиг. 4.24).

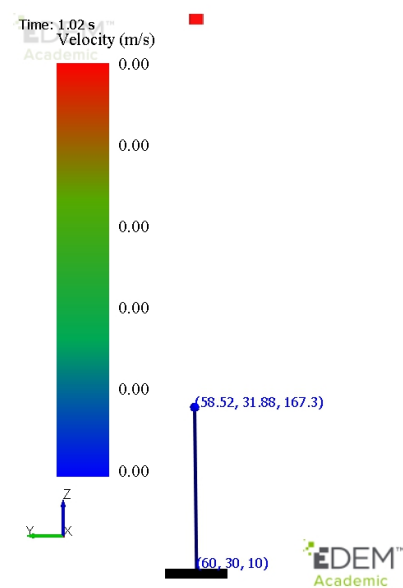
Максимално достигнатата скорост по време на симулационното моделиране е 3,19 m/s, показано в графиката на фиг. 4.25 и фиг. 4.26 показват динамиката на отскоците и затихването.



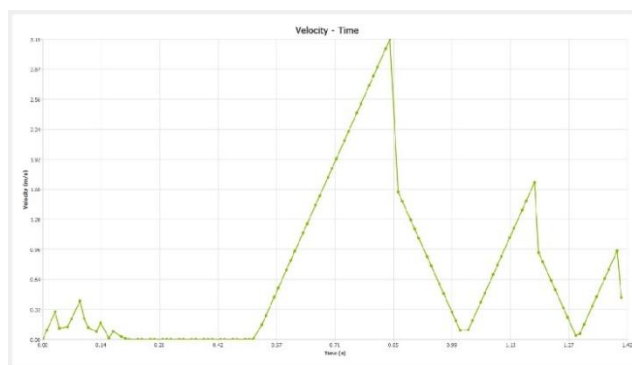
Фигура 4.22 Първоначален момент от симулацията.



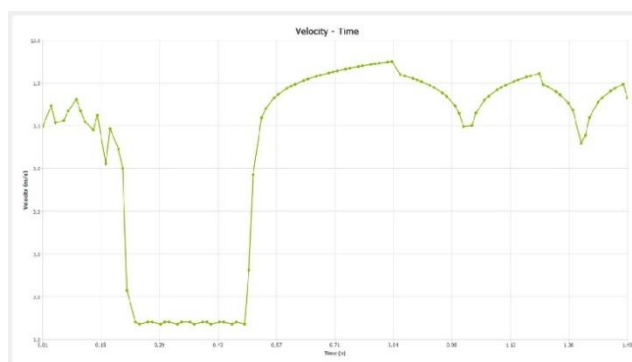
Фигура 4.23 *Разстояние на отскок.*



Фигура 4.24 *Скорост в момента, преди сферата да смени посоката си.*



Фигура 4.25 Скорост при свободно падане на сфера.



Фигура 4.26 Динамика на отскока при свободна падане на сфера.

Получените резултати от симулационното моделиране се доближават до отчетените средни стойности при провеждането на опитните експерименти. Получената средна височина на отскок от експерименталното изследване е $h_2 = 163,7 \text{ mm}$. Отчетената височина на отскок от симулационното моделиране е $167,3 \text{ mm}$. От полученият резултат следва да се извади радиуса на сферата от $4,5 \text{ mm}$ и се получава височина на отскок при симулационното моделиране от $h_2 = 162,8 \text{ mm}$.

Получените стойности при коефициент на реституция от проведеното експериментално изследване е $e = 0.5495$, а от симулационното моделиране е $e = 0.5490$. При такава разлика може да се счита, че верификацията, получена при симулационното моделиране отговаря на опитно установения коефициент на възстановяване.

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

В допълнение към гореспоменатата подготовка и методика на изследване (глава 3, точка 3,4), експерименталната настройка беше моделирана в софтуера. 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	e- 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

Плоча/Сфера	Височина на отскок [mm]	D/C	е- коефициент на реституция SQRT D/C
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

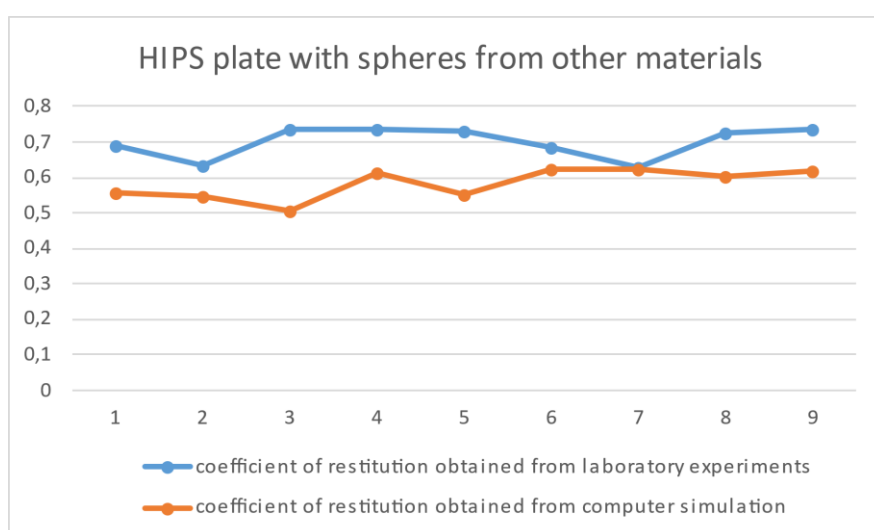
Софтуерът не отчита температурата и влажността на околната среда. Построени са две графики за всеки от двата типа материал, за да се представят резултатите по по-ясен и сравнителен начин и да се улесни сравнението с резултатите от лабораторните експерименти. Фигура 4.27 показва сравнителна графика за експерименталните и симулационните данни на EasyFil HIPS материала, а Фигура 4.28 показва сравнителна графика за експерименталните и симулационните данни на TPU материала.

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

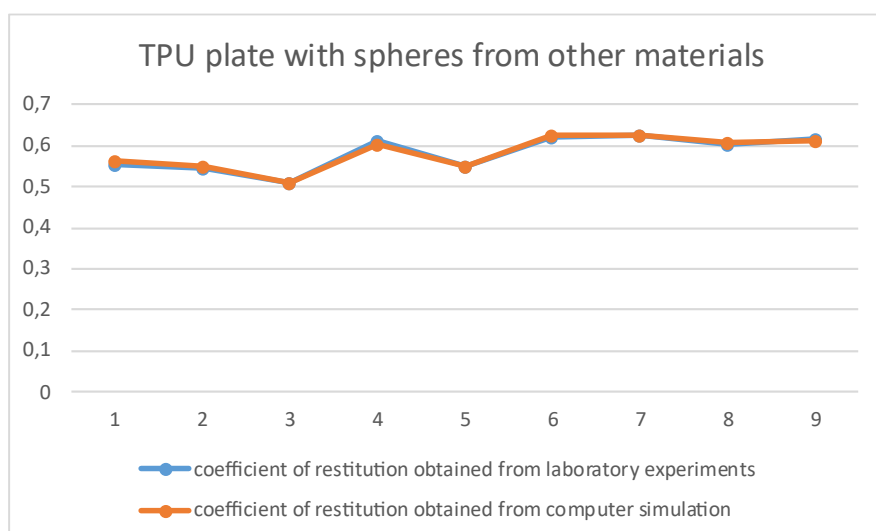
Плоча/Сфера	Височина на отскок [mm]	D/C	е- коефициент на реституция SQRT D/C
Easy Fil HIPS / Easy Fil HIPS (dark)	308,1	0,474	0,688477
Easy Fil HIPS /TPU	262,4	0,403692	0,635368
Easy Fil HIPS / Easy Fil HIPS (blue)	351,1	0,540154	0,734952
Easy Fil HIPS /PLA	352,6	0,542462	0,73652
Easy Fil HIPS /PETG	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 Симуляционно 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



Фигура 4.27 Експериментални резултати от HIPS в сравнение със симулирани резултати



Фигура 4.28 Експериментални резултати от TPU в сравнение със симулирани резултати

4.4. Заключение

В резултат на проведените експериментални изследвания върху 3D отпечатани полимерни и композитни материали бяха установени закономерности, характеризиращи взаимовръзката между геометрията на пробите, технологичните параметри на адитивното производство и получените трибологични и механични характеристики. Анализът на резултатите показва, че както материалният състав, така и конфигурацията на образците оказват съществено влияние върху стойностите на коефициентите на триене при плъзгане и търкаляне, както и върху коефициента на възстановяване след деформация.

Получените стойности на микротвърдостта потвърждават зависимостта между структурната хомогенност на материала и неговата устойчивост при локално натоварване. Извършените металографски наблюдения разкриват специфични морфологични особености и структурни дефекти, присъщи за различните видове материали и параметри на печат, което предоставя важна информация за оптимизиране на процесите на 3D отпечатване.

В заключение, изследването на трибологичните свойства на 3D отпечатаните материали има съществен принос към задълбочаването на познанията в областта на трибологията на полимерните нишки, използвани в адитивните технологии. То полага основата за усъвършенстване на симулационните модели, прилагани в инженерната и индустриалната практика. Коефициентите на триене при плъзгане, при търкаляне и на възстановяване бяха определени чрез експериментален метод с гравитационно устройство, осигуряващ висока точност и възпроизводимост на резултатите.

Съпоставката между експерименталните данни и резултатите от симулационното моделиране показва много добро съответствие, като отклоненията са в границите между 0,19% и 7,01%. Това потвърждава валидността на използваната методика и създава предпоставки за калибриране и усъвършенстване на симулационните модели, прилагани за анализ на процесите, протичащи в системи с контактно взаимодействие, включително при моделиране на динамиката на топкови мелници. Сравнителният анализ между получените експериментални резултати и числените симулации добавя надеждност и достоверност към направените изводи. Това от своя страна представлява важна стъпка към оптимизиране на производствените процеси с добавена стойност и допринася за развитието на високоефективни инженерни решения на основата на 3D отпечатани полимерни и композитни материали.

Особено внимание бе отделено на определянето на твърдостта по Rockwell на меки образци, тъй като този метод е ключов за оценката на механичните свойства на материалите. Правилният избор на скала, прецизната подготовка на пробите и стриктното спазване на методиката и съответните стандарти са от съществено значение за получаването на надеждни и точни резултати. Интерпретацията на измерените стойности следва да се извършва внимателно, като се отчитат използваната скала и характеристиките на изследвания материал.

Проведените експерименти показаха, че ултравиолетовото (UV) третиране може да се използва за повишаване на твърдостта на повърхността на смолисти проби след 3D отпечатване, но този подход е приложим единствено при обекти, при които се изисква повърхностно втвърдяване. Установено бе, че времето за фотополимеризация не оказва влияние върху вътрешната структура на образците, изследвани чрез СТ томография. Възможно е обаче при използване на микротомография да се открият промени в структурата на външните слоеве на пробите.

Експериментално е установено, че време на UV втвърдяване от около 2–4 минути е достатъчно за получаване на 3D отпечатани смолни обекти, предназначени за тактилни приложения за хора с нарушено зрение, като същевременно се осигурява достатъчна повърхностна твърдост.

За тестваните плоски образци е използван предишен опит на екипа с PolyJet технологията, при която дебелината на пробите е била 3 mm. В настоящото изследване плочите бяха използвани с цел да се изследва влиянието на дебелината и количеството материал върху твърдостта и здравината. Получените резултати показват, че минимална дебелина от 2–3 mm е необходима за предотвратяване на разрушаване на детайла и за осигуряване на необходимата механична устойчивост при експлоатация.

Глава 5

Насоки за бъдещи изследвания

Въз основа на получените експериментални резултати, разработените методики и направените изводи, могат да се очертаят редица посоки за бъдещо развитие и усъвършенстване на изследванията, свързани с трибологичните и механичните свойства на 3D отпечатани полимерни и композитни материали. Следващите стъпки имат за цел да разширят приложимостта на постигнатите резултати, да повишат точността на симулационните модели и да подпомогнат внедряването на адитивните технологии в индустриалната практика.

5.1. Усъвършенстване на методиките за 3D принтиране

Необходимо е да се продължи работата по оптимизация на параметрите на 3D печата – температура на екструдирание, скорост на печат, дебелина на слоя и ориентация на детайла – с цел минимизиране на вътрешните напрежения и дефекти в структурата. Препоръчва се провеждане на експерименти с различни видове технологии за адитивно производство (например SLA, SLS, PolyJet), за да се сравнят получените материали по тяхната повърхностна морфология, плътност и механична устойчивост.

Допълнително, бъдещи изследвания могат да включват използването на рециклирани полимери и биоразградими материали, което ще допринесе за екологичната устойчивост на производствените процеси и за намаляване на отпадъците, генерирани при адитивното производство.

В тази връзка особено перспективно направление е създаването и изследването на свойствата на материали, получени чрез рециклиране на 3D отпечатани изделия. Разширяването на лабораторното и технологичното оборудване предоставя нови възможности за разработване и изпитване на подобни материали, което ще позволи по-задълбочено изследване на връзката между процеса на рециклиране, структурата и свойствата на получените композити.

Адитивното производство открива все по-широк хоризонт за експериментирание с нови материали, включително модифицирани полимери, наноусилени композити и рециклирани смеси. Тази тенденция не само насърчава устойчивото развитие, но и подпомага създаването на иновативни материали с подобрени механични и трибологични характеристики, подходящи за високотехнологични приложения.

5.2. Разширяване на изследванията на механичните и трибологичните свойства

Предвижда се задълбочаване на анализа на трибологичните характеристики чрез изследване на поведението на материалите при различни температурни и влажностни условия, както и при динамични натоварвания. Важно направление е и изследването на влиянието на повърхностните обработки (напр. UV втвърдяване, плазмено третиране,

покрития с наноструктури) върху твърдостта, изнosoустойчивостта и коефициента на триене.

Разширяване на методиките може да се осъществи и чрез използване на инструментални техники за микро- и наноизмервания – например наноиндентирание или микротомографски анализ (micro-CT) – за по-прецизно определяне на влиянието на вътрешната структура върху поведението на материала при натоварване.

5.3. Усъвършенстване на симулационните модели

В следващия етап на изследванията следва да се продължи разработването и валидацията на симулационните модели в среда на EDEM Software или други подходящи системи за дискретни елементи (DEM). Особено важно е калибрирането на параметрите на симулациите спрямо реалните експериментални данни за триене и възстановяване, получени чрез гравитационното устройство.

Възможно е интегриране на симулациите с методи на крайните елементи (FEM), което ще позволи по-пълна представа за напреженията и деформациите в материалите при различни режими на натоварване. Тази комбинирана DEM–FEM стратегия ще допринесе за създаване на цифров близник (Digital Twin) на процесите на взаимодействие между частиците в трибологичните системи.

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

Получените резултати и разработените методики могат да бъдат приложени в разработването на функционални детайли с висока изнosoустойчивост, предназначени за машиностроенето, роботиката, медицината и потребителски изделия. Особено перспективно направление е разработването на 3D отпечатани обекти за хора със зрителни увреждания, при които материалите трябва да съчетават оптимална твърдост, безопасност и приятна тактилна повърхност.

В бъдеще се предвижда и проучване на възможностите за създаване на интелигентни композитни материали със самосмазващи се или самовъзстановяващи се свойства, които да осигуряват по-добри трибологични характеристики при продължителна експлоатация.

5.5. Развитие на научно-приложната база

За повишаване на точността и мащабността на изследванията е необходимо да се развие експерименталната база чрез въвеждане на автоматизирани измервателни системи и сензорни технологии за онлайн мониторинг на процесите при триене и деформация. Разширяването на базата данни с експериментални и симулационни резултати ще позволи изграждането на емпирични модели и машинно-обучителни алгоритми за прогнозиране на свойствата на 3D отпечатаните материали още на етапа на проектиране.

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 екструдирание 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. Получените резултати имат приложен характер, като могат да бъдат използвани при проектирането на елементи, подложени на триене и контактено натоварване, в различни индустриални области – от машиностроенето до медицинските и потребителски приложения.

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 контактно 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] Laverne, F., Marquardt, R., Segonds, F., Koutiri, I. и Perry, N. (2019) 'Improving resources consumption of additive manufacturing use during early design stages: a case study', *International Journal of Sustainable Engineering*, 12(6), pp. 365–375. doi: 10.1080/19397038.2019.1620897.
- [2] Gebler, M., Schoot Uiterkamp, A.J.M. и Visser, C. (2014) 'A global sustainability perspective on 3D printing technologies', *Energy Policy*, 74, pp. 158–167. doi: 10.1016/j.enpol.2014.08.033.
- [3] Dhakal, N., Espejo, C., Morina, A. и Emami, N. (2024) 'Tribological performance of 3D printed neat and carbon fiber reinforced PEEK composites', *Tribology International*, 193, 109356. doi: 10.1016/j.triboint.2024.109356.
- [4] Kodama, H., 1981. Automatic Method for Fabricating a Three-Dimensional Plastic Model with Photo-Hardening Polymer. *Review of Scientific Instruments*, 52(11), pp.1770–1773. Available at: <https://pubs.aip.org/aip/rsi/article/52/11/1770/309975/Automatic-method-for-fabricating-a-three> [Прегледано на 1 March 2025].
- [5] Wohlers Associates, 2020. Additive Manufacturing Terminology. [online] Достъпно на: <https://wohlersassociates.com/terminology-and-definitions/additive-manufacturing/> [Прегледано на 1 March 2025].
- [6] NIST, 2020. What is Additive Manufacturing?. [online] Достъпно на: <https://www.nist.gov/additive-manufacturing> [Прегледано на 1 March 2025].
- [7] Formlabs, 2025. Additive vs. Subtractive Manufacturing. [online] Available at: <https://formlabs.com/blog/additive-manufacturing-vs-subtractive-manufacturing/> [Прегледано на 1 септември 2025].
- [8] Protolabs, 2025. What is Subtractive Manufacturing? [online] Available at: <https://www.hubs.com/what-is-subtractive-manufacturing/> [Прегледано на 1 March 2025].
- [9] Dassault Systèmes, 2025. Additive vs. Subtractive Manufacturing. [online] Available at: <https://www.3ds.com/make/solutions/blog/additive-vs-subtractive-manufacturing> [Accessed 8 Sep. 2025].
- [10] KETIV, 2025. Subtractive Manufacturing: Past, Present, and Future. [online] Available at: <https://ketiv.com/blog/subtractive-manufacturing-past-present-and-future/> [Accessed 8 March 2025].
- [11] Oxford English Dictionary, “Tribology,” accessed February 21, 2024. [Online]. Available: https://www.oed.com/dictionary/tribology_n?tl=true.
- [12] Манолов, Н.Т. и Кандева, М.К., *Обща трибология.*, София Технически университет – София.
- [13] Kandeva, M., Vencl, A. and Karastoyanov, D., 2016. *Advanced Tribological Coatings for Heavy-Duty Applications: Case Studies*. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House.
- [14] 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.
- [15] H. P. Jost, “Tribology — Origin and future,” *Wear*, vol. 136, no. 1, pp. 1-17, 1990, doi: 10.1016/0043-1648(90)90068-L

- [16] Bhushan, B., 2013. Introduction. In: Introduction to Tribology. Chichester: John Wiley & Sons, pp. 1–8. Available at: <https://doi.org/10.1002/9781118403259>
- [17] Dowson, D., 1998. History of Tribology. 2nd ed. Bury St Edmunds: Professional Engineering Publishing. ISBN 978-1-860-58070-3.
- [18] Halling, J., 1979. Surface coatings materials conservation and optimum tribological performance. Tribology International, 12(5), pp.203–208. Available at: [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(79\)90189-0](https://doi.org/10.1016/0301-679X(79)90189-0)
- [19] Amontons, G. (1699) De la resistance causée dans les machines. Paris: Mémoires de l'Académie Royale.
- [20] Euler, L. (1750) Sur le frottement des corps solides. Mémoires de l'Académie des Sciences de Berlin, 3, pp. 122–132.
- [21] Coulomb, C.A. (1785) Théorie des machines simples: en ayant égard au frottement de leurs parties et à la roideur des cordages. Paris: Bachelier.
- [22] Hardy, W. B. и Hardy, J. K., “Note on Static Friction and on the Lubricating Properties of Certain Chemical Substances”, Philosophical Magazine, 1919, том 38, бр. 223, стр. 32–48
- [23] G. A. Tomlinson, “A Molecular Theory of Friction”, Philosophical Magazine Journal of Science, 1929, том 7, бр. 46, стр. 905–939
- [24] Bowden, F.P. & Tabor, D., 1950. The friction and lubrication of solids. Oxford: Clarendon Press
- [25] Yastrebov, V.A., 2017. Contact mechanics. [online] Available at: https://www.yastrebov.fr/LECTURES/DMS_Yastrebov_CMET_17_0.pdf
- [26] Holm, R., 1946. Electrical contacts. Stockholm: H. Gerbers Förlag
- [27] Dowson, D., 1992. Friction and traction in lubricated contacts. In: I.L. Singer and H.M. Pollock, eds. Fundamentals of friction: macroscopic and microscopic processes. NATO ASI Series (Series B: Physics), vol. 220. Dordrecht: Springer, pp. 325–338. Available at: https://doi.org/10.1007/978-94-011-2811-7_18
- [28] Bultrib, 1963. Tribology in Bulgaria. Beginning and Advance. [online] Available at: <https://bultrib.com/?l=1&p=2> [Accessed 5 March 2025]
- [29] Bultrib, 2014. 40 Years Tribology in Bulgaria. [pdf] Available at: https://bultrib.com/_data/40_years.pdf [Accessed 5 March 2025]
- [30] Assenova, Emilia & Kandeva, M.. (2008). State and outlooks of bulgarian tribology. Journal of the Balkan Tribological Association. 14. 274-283.
- [31] Манолов, Н., Кандева, М. и Асенова, Е., 2007. Концепция за развитието на трибологията в България. София: Св. Ив. Рилски.
- [32] Държавен вестник, 1990. Брой 34. София: Народно събрание.
- [33] ИНГА, 2008. Списание „Контакти“. София: Интердисциплинарна гражданска академия.
- [34] 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].

- [35] 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].
- [36] 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]
- [37] 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].
- [38] Stachowiak, G.W. & Batchelor, A.W. (2013). Engineering Tribology. 4th ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann.
- [39] Kato, K. (2011). Industrial tribology: Trends and challenges for energy-efficient manufacturing. *Tribology International*, 44(5), pp. 498–508.
- [40] 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.
- [41] Holmberg, K. & Erdemir, A. (2017). The impact of tribology on energy use and CO2 emissions. *Tribology International*, 115, pp. 1–12.
- [42] Jost, H.P. (1966). Lubrication (Tribology) – A Report on the Present Position and Industry Needs. London: Her Majesty's Stationery Office.
- [43] Oxford University Press (n.d.). Oxford Dictionary of Science. Available at: <https://www.oxfordreference.com>
- [44] 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.
- [45] American Society for Testing and Materials (ASTM) (2001). ASTM Standards on Wear and Materials Testing. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [46] Halling, J. (1979). Principles of Tribology. London: Macmillan.
- [47] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (1969). Engineering Materials Wear Research Group Report. Paris: OECD.
- [48] Rabinowicz, E. (1995). Friction and Wear of Materials. 2nd ed. New York: Wiley.
- [49] Ahmed Abdelbary, Li Chang, 1 - Introduction to engineering tribology, Principles of Engineering Tribology, Academic Press, 2023, Pages 1-32, ISBN 9780323991155, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99115-5.00013-X>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978032399115500013X>)
- [50] Engineering Review (2013). 'Industrial lubricants'. Engineering Review, [online] 1(1). Available at: <https://www.engineering-review.bg/bg/industrialni-smazochni-materiali/2/2113/> [Accessed 1 March 2025].
- [51] Тошев, Б. (1973). Теоретична механика. София: Техника.
- [52] Coulomb, C.-A. (1785). Recherches théoriques sur le frottement.
- [53] ASTM International (2017). Standard Test Method for Vickers Hardness of Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International
- [54] Halling, J. (1979). Principles of Tribology. London: Macmillan

- [55] International (2017a). Brinell Hardness Test Method (BH). Geneva: International Organization for Standardization (ISO)
- [56] International (2017b). Rockwell Hardness Test Method (HR). Geneva: International Organization for Standardization (ISO)
- [57] Luyckx, S. & Love, A. (2004). Hardness and wear resistance of materials. *Journal of Materials Science*, 39(5), pp. 1239–1247
- [58] Mutton, P.J. & Watson, J.D. (1978). Hardness testing of polymers and elastomers. *Polymer Testing*, 1(1), pp. 63–71.
- [59] Rabinowicz, E. (1995). *Friction and Wear of Materials*. 2nd ed. New York: Wiley
- [60] Halling, J. (1979). 'The tribology of surface films', *Wear*, 53(2), pp. 183–190.
- [61] Luyckx, S. and Love, A. (2004). 'The relationship between the abrasion resistance and the hardness of WC-Co alloys', *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 104(10), pp. 579–582.
- [62] Mutton, P.J. and Watson, J.D. (1978). 'Some effects of microstructure on the abrasion resistance of metals', *Wear*, 48(4), pp. 385–398.
- [63] 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
- [64] LibreTexts (2020). Stress-Strain Curves. LibreTexts Engineering. Available at: <https://eng.libretexts.org>
- [65] Pearson (2010). *Mechanical Behavior, Testing, and Manufacturing Properties of Materials*. Pearson Higher Ed.
- [66] Roylance, D. (2001). Stress-Strain Curves. MIT. Available at: <https://web.mit.edu/course/3/3.11/www/modules/ss.pdf>
- [67] UOBabylon (2016). Plastic Deformation and Stress-Strain Curves. University of Babylon.
- [68] University Physics (2016). Elasticity and Plasticity. UCF Pressbooks. Available at: <https://pressbooks.online.ucf.edu/osuniversityphysics/chapter/12-4-elasticity-and-plasticity>
- [69] Dowling, N.E. (2012). *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*. 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson.
- [70] Ambrosio, J. (2001). *Constitutive Models for Engineering Materials*. Dordrecht: Springer.
- [71] Barbera, D., Chen, X. & Liu, Y. (2016). Creep-fatigue interaction in materials at high temperature. *International Journal of Fatigue*, 92(1), pp. 562–573.
- [72] Garofalo, F. (1965). *Fundamentals of Creep and Creep-Rupture in Metals*. New York: Macmillan.
- [73] Dowling, N.E. (2012). *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*. 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson.
- [74] Abdelbary, A. (2014). *Creep Resistance of Polymers and Composites*. Amsterdam: Elsevier.

- [75] Chand, N. & Fahim, M. (2021). *Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites*. 2nd ed. Cambridge: Woodhead Publishing
- [76] 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.
- [77] Somorjai, G.A. and Li, Y. (2010). *Introduction to Surface Chemistry and Catalysis*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.
- [78] McFadden, C., Soto, C. & Spencer, N. D., 1997. Adsorption and surface chemistry in tribology. *Tribology International*, 30(12), pp. 881–888
- [79] Lenard, J. (2002). Boundary lubrication and tribochemistry.
- [80] Hardy, J. and Bircumshaw, H. (1925). The monolayer theory of boundary lubrication.
- [81] Stachowiak, G.W. (2005). *Engineering Tribology*. 3rd ed. Oxford: Elsevier.
- [82] Blanck, R., Loehlé, S., Steinmann, F. & Michel, B. (2020). Tribology of Lubricant Additives: Chemical Structure and Surface Interaction. *Tribology International*, 150, 106437.
- [83] Lenard, J. (2002). Lubrication and Wear of Materials. *Materials Science and Engineering: A*, 332(1–2), pp. 1–11
- [84] Merz, R., Brodyanski, R. & Kopnarski, M. (2015). Oxide Film Formation and Tribological Behavior of Stainless Steel Surfaces. *Tribology International*, 82, pp. 231–242.
- [85] Quinn, T.F. (1992). The Role of Oxide Films in Metal Wear. *Wear*, 158(1), pp. 47–63.
- [86] Quinn, T.F. (1994). Frictional Heating and Oxide Formation in Metal Sliding Contacts. *Tribology Transactions*, 37(3), pp. 483–492.
- [87] Quinn, T.F. (1998). Surface Oxidation and Wear Mechanisms of Metals. *Tribology International*, 31(1–3), pp. 35–44.
- [88] 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.
- [89] 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.
- [90] Krishnaraj, R. & Roy, S. (2013). Diffusion Treatments in Tribology: Mechanisms and Applications. *Tribology International*, 66, pp. 1–12.
- [91] Tec-Science, 2021. Diffusion annealing of steel. [online] Available at: <https://www.tec-science.com/material-science/heat-treatment-steel/annealing-process-of-steel-diffusion-annealing> [Accessed 3 March 2025].
- [92] Maboudian, R. & Carraro, C. (2004). Surface processes and adhesion in microelectromechanical systems (MEMS). *Surface Science Reports*, 56(1–4), pp. 1–27.
- [93] Pattanaik, S. & Ojha, S. (2021). Tribological Challenges in MEMS Devices and Surface Treatments. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 30(5), pp. 923–936.
- [94] Sammoura, F., Hancer, M. & Yang, Y. (2011). Surface Adhesion and Friction in MEMS: Experimental Investigations. *Tribology Letters*, 44(3), pp. 377–389.

- [95] 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.
- [96] Chu, J., Zhu, X., Chen, W. & Lai, M. (2000). SAM coatings to reduce adhesion in MEMS devices. *Sensors and Actuators A: Physical*, 81(1–3), pp. 40–45.
- [97] Carpick, R.W., 1997. The study of contact, adhesion and friction at the atomic scale by atomic force microscopy. [online] Available at: https://www.researchgate.net/figure/The-Hertz-area-load-curve-and-the-JKR-DMT-transition-plotted-in-dimensionless-units_fig20_234354816 [Accessed March 2025].
- [98] Ciavarella M, Joe J, Papangelo A, Barber JR. The role of adhesion in contact mechanics. *J R Soc Interface*. 2019 Feb 28;16(151):20180738. doi: 10.1098/rsif.2018.0738. PMID: 30958203; PMCID: PMC6408355
- [99] Ludema, K.C., 1996. *Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology*. Boca Raton, New York, London, Tokyo: CRC Press.
- [100] Bhushan, B., 2013. *Principles and Applications of Tribology*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd. ISBN 9781119944546.
- [101] Bradley, R.S., 1932. ‘The cohesion between solid surfaces’, *Philosophical Magazine*, 13, p. 853.
- [102] Morton Corn, 1961. The adhesion of solid particles to solid surfaces, I. A review. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 11(11), pp. 523–528. doi:10.1080/00022470.1961.10468032.
- [103] Young, T., 1805. An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 95, pp.65–87. DOI: 10.1098/rstl.1805.0005.
- [104] Ge, L., Zhang, Y., Liu, Y., et al., 2019. Wettability of nanostructured surfaces: A review. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 19(1), pp. 1–14. doi:10.1166/jnn.2019.16763.
- [105] Steijn, A., 1967. The contact angle and its application to the study of wettability. *Journal of Applied Polymer Science*, 11(4), pp. 795–800. doi:10.1002/app.1967.070110415.
- [106] Blanck, J., Müller, J., & Schmidt, M., 2020. Simulation of contact angle hysteresis on structured surfaces. *Langmuir*, 36(5), pp. 1234–1242. doi:10.1021/acs.langmuir.9b00442.
- [107] Yuan, Y. and Lee, T.R., 2013. Contact Angle and Wettability Properties. In: G. Bracco and B. Holst, eds. *Surface Science Techniques*. Springer, pp. 3–34. doi:10.1007/978-3-642-34243-1.
- [108] Bertrand, E., Blake, T.D. & Coninck, J. (2009). Dynamic wetting: Theoretical models for droplet motion. *Advances in Colloid and Interface Science*, 146(1–2), pp. 48–56
- [109] Abdelbary, A. & Chang, L., 2023. *Principles of Engineering Tribology: Fundamentals and Applications*. eBook. Academic Press. ISBN 9780323991162.
- [110] Kalin, M., Siddiqui, M.S.N. & Požar, T., 2025. Ready-to-use contact-temperature model for polymer/steel pin-on-disc contacts with some improved thermodynamic approaches. *Tribology International*, 210, p.110732. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X25002270> [Accessed 2 September 2025].

- [111] Rtec Instruments, 2025. Block on Ring Tribometer Applications. [online] Available at: <https://rtec-instruments.com/tribometer/tribometer-applications/block-on-ring-tribometer/> [Accessed: 20 April 2025].
- [112] AMT Advanced Material Technology, 2025. Standard four-ball tester. [online] Available at: <https://www.china-amttech.com/standard-four-ball-tester/> [Accessed: 20 April 2025].
- [113] 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].
- [114] Evident Scientific. (2024). What Is Microhardness Testing? Comparing Vickers and Кноор. Достъпно от: <https://evidentscientific.com/en/insights/what-is-the-difference-between-microhardness-and-nanoindentation>
- [115] Nanoscience Instruments. (n.d.). Mechanical Testing. Достъпно от: <https://www.nanoscience.com/techniques/mechanical-testing/>
- [116] NanoScience Instruments. (n.d.). Nanoindentation Methods. Достъпно от: <https://www.nanoscience.com/techniques/nanoindentation/nanoindentation-methods/>
- [117] Honor Test Technology Co., Ltd. (2018) 'За твърдостта на пластмасовия продукт'. Достъпно на: <https://bg.honortestequipment.com/info/about-plastic-product-hardness-31361633.html> (Дата на достъп: 20 April 2025).
- [118] Eurolab, 2025. Анализ на твърдостта по Шор D. [online] Достъпно на: <https://www.eurolab.net/bg/testler/malzeme-testleri/shore-d-sertlik-analizi/> [Достъп: 20 April 2025].
- [119] MGS Plastics, 2022. What is Shore Hardness? [online] Available at: <https://mgsplastics.co.uk/what-is-shore-hardness/> [Accessed 2 May 2025].
- [120] Немцев, А. (2024) 'Каква е твърдостта по Рокуел?', Noblie Custom Knives. Достъпно на: <https://nobliescustomknives.com/bg/rockwell-hardness-test-for-knives/> (Прегледано: 3 May 2025).
- [121] Sauter GmbH (2017) Instruction Manual Digital Shore Hardness Tester SAUTER HD. Available at: <https://compactinstruments.co.uk/wp-content/uploads/2017/05/Sauter-HD-Professional-Shore-Hardness-Tester-Instruction-Manual.pdf> (Accessed: 4 May 2025).
- [122] EBPB 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).
- [123] NAC Memrecam <https://www.nacinc.com/> (last accessed Sep. 2025)
- [124] 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: Azbuki National Publishing House, pp. 40-53

- [125] 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
- [126] Acierno, D., 2023. Fused Deposition Modelling (FDM) of Thermoplastic Materials. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10744784/> [Accessed 5 May 2025].
- [127] 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].
- [128] Formlabs, 2025. Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing. [online] Available at: https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/?srsltid=AfmBOoo0UY6N5mVla26XASmWg3tPARJpyhzQOtKiykFjisSlpayTB96T&utm_source=chatgpt.com [Accessed 2 May 2025].
- [129] Berman, B., 2012. 3-D printing: The new industrial revolution. Business Horizons, 55(2), pp.155–162.
- [130] Melchels, F.P.W., Domingos, M.A.N., Klein, T.J., Malda, J., Bartolo, P.J. & Hutmacher, D.W., 2010. Additive manufacturing of tissues and organs. Progress in Polymer Science, 37(8), pp.1079–1104.
- [131] 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>
- [132] Xingjian Wei, Na Zou, Li Zeng, Zhijian Pei, PolyJet 3D printing: Predicting color by multilayer perceptron neural network, Annals of 3D Printed Medicine, Volume 5, 2022, 100049, ISSN 2666-9641, <https://doi.org/10.1016/j.stlm.2022.100049>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666964122000054>)
- [133] Formlabs, 2025. What is Selective Laser Sintering? [online] Available at: https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/?srsltid=AfmBOoo59ePtcySX2LlSPMyOBDrMMlOdU2ogr1nfAx2QRSuNud8bUMTq&utm_source=chatgpt.com [Accessed 5 July 2025].
- [134] 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].
- [135] 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].

- [136] Wikipedia, 2025. 3D printing processes. [online] Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing_processes?utm_source=chatgpt.com [Accessed 5 July 2025].
- [137] Song, Y., Ghafari, Y., Asefnejad, A. & Toghraie, D., 2024. An overview of selective laser sintering 3D printing technology for biomedical and sports device applications: Processes, materials, and applications. *Optics & Laser Technology*, 171, p.110459. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110459> [Accessed 25 July 2025].
- [138] Kruth, J.P., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L. & Rombouts, M., 2005. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 11(1), pp.26–36.
- [139] Yadroitsev, I. & Smurov, I., 2010. Selective laser melting technology: From the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape. *Physics Procedia*, 5, pp.551–560.
- [140] Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Humbeeck, J.V. & Kruth, J.P., 2010. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti–6Al–4V. *Acta Materialia*, 58(9), pp.3303–3312.
- [141] Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E. & Emmelmann, C., 2016. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, pp.371–392.
- [142] Gibson, I., Rosen, D.W. & Stucker, B., 2021. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 3rd ed. Springer, Cham.
- [143] Frazier, W.E., 2014. Metal additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), pp.1917–1928.
- [144] DebRoy, T., Wei, H.L., Zuback, J.S., Mukherjee, T., Elmer, J.W., Milewski, J.O., Beese, A.M., Wilson-Heid, A., De, A. & Zhang, W., 2018. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, pp.112–224.
- [145] Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q. & Hui, D., 2018. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, pp.172–196.
- [146] 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.
- [147] 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.
- [148] Pham, D.T. & Dimov, S.S., 2001. *Rapid Manufacturing: The Technologies and Applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling*. Springer, London.
- [149] Guo, N. & Leu, M.C., 2013. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(3), pp.215–243.
- [150] 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.

- [151] 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).
- [152] Hirt, G., Reich, S. & Michalek, J. (2023) “A Review of Laminated Object Manufacturing (LOM) Aspects and Various Processes Used in It” International Journal of Advanced Engineering Research & Science (IJAERS), 10(1), pp. 46-54. DOI:10.22161/ijaers.101.8. Available at: https://ijaers.com/uploads/issue_files/8IJAERS-01202312-AReview.pdf (Accessed: 1 June 2025).
- [153] Kumaresan, R., Samykano, M., Kadirgama, K., Devarajan, R., Wai Keng, N. & Pandey, A.K. (2021) ‘3D Printing Technology for Thermal Application: A Brief Review’, Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 83 (2), pp. 84-97. Available at: https://www.researchgate.net/publication/352769550_3D_Printing_Technology_for_Thermal_Application_A_Brief_Review/figures?lo=1 (Accessed: 1 June 2025).
- [154] TEVO, 2025. TEVO Tornado 3D Printer Specifications. [online] Available at: <https://www.tevo3d.com/product/tornado-3d-printer> (Accessed 5 June 2025).
- [155] Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q. & Hui, D., 2018. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B: Engineering, 143, pp.172–196.
- [156] Gibson, I., Rosen, D.W. & Stucker, B., 2021. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 3rd ed. Springer, Cham.
- [157] Ultimaker, n.d. UltiMaker S5 – features and specs. Available at: <https://ultimaker.com/3d-printers/s-series/ultimaker-s5/> [Accessed 8 June. 2025].
- [158] RS Online, n.d. Ultimaker S5 Specification sheet. Available at: <https://docs.rs-online.com/8d73/A700000006509368.pdf> [Accessed 8 June 2025].
- [159] MatterHackers, n.d. Ultimaker S5 3D Printer technical specifications. Available at: <https://www.matterhackers.com/store/1/ultimaker-s5> [Accessed 8 June 2025].
- [160] Dynamism, n.d. Ultimaker S5 – Simple, Clean, Stylish Desktop 3D Printer. Available at: <https://www.dynamism.com/ultimaker/ultimaker-s5.html> [Accessed 8 June 2025].
- [161] PolyU, n.d. Ultimaker S5 product data sheet. Available at: https://www.polyu.edu.hk/u3dp/-/media/Department/U3DP/Content/Facilities/brochure_Ultimaker_S5.pdf [Accessed 8 June 2025].
- [162] Bambu Lab, n.d. Bambu Lab P1S specifications. Available at: <https://us.store.bambulab.com/products/p1s> (Accessed 8 June 2025).
- [163] Create Education Marketplace, 2023. bambu-lab-P1S-tech-specs.pdf. Available at: <https://marketplace.createeducation.com/.../bambu-lab-P1S-tech-specs.pdf> (Accessed 8 June 2025).
- [164] Tom’s Hardware, n.d. Bambu Lab P1S 3D Printer review and specs. Available at: <https://www.tomshardware.com/reviews/bambu-lab-p1s> (Accessed 8 June 2025).

- [165] Top3DShop, n.d. Performance specifications of the Bambu Lab P1S. Available at: <https://top3dshop.com/product/bambu-lab-p1s-3d-printer> (Accessed 8 June 2025).
- [166] MatterHackers, n.d. Bambu Lab P1S Combo 3D Printer overview. Available at: <https://www.matterhackers.com/store/1/bambu-lab-p1s-3d-printer> (Accessed 8 June 2025).
- [167] Bambu Lab Wiki, n.d. Unboxing P1S: physical dimensions and features. Available at: <https://wiki.bambulab.com/en/p1/manual/unboxing-p1s> (Accessed 8 June 2025).
- [168] Reddit, 2023. Resolution/Layer thickness of Bambu Lab P1S Printer. Available at: <https://www.reddit.com/r/BambuLab/comments/> (Accessed 8 June 2025).
- [169] Reddit, 2023. Layer height with 0.4mm nozzle - max 0.28mm. Available at: <https://forum.bambulab.com/t/layer-high-with-0-4mm-nozzle-max-0-28mm-need-0-3mm> (Accessed 8 June 2025).
- [170] 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).
- [171] 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].
- [172] 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].
- [173] 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].
- [174] 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].
- [175] Proto3000. (n.d.). Objet260 Connex3 3D Printer. [online] Available at: <https://proto3000.com/product/objet260-connex3/> [Accessed 15 July 2025].
- [176] Anycubic (2024) Photon M3 Max – Specifications. Available at: <https://www.anycubic.com/products/photon-m3-max> [Accessed: 21 July 2025].
- [177] 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.
- [178] Hull, C. W. (1986) Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography, U.S. Patent 4,575,330.
- [179] Gibson, I., Rosen, D. W. & Stucker, B. (2020) *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 3rd edn., Springer, Cham.
- [180] 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]
- [181] All3DP (2023) Anycubic Photon M3 Max Review: Budget Bigness. Available at: <https://all3dp.com/1/anycubic-photon-m3-max-review/> [Accessed: 21 July 2025].

- [182] 3DPrintersBay (2024) Anycubic Photon M3 Max 7K Resin 3D Printer. Available at: <https://www.3dprintersbay.com/anycubic-photon-m3-max> [Accessed: 21 July 2025].
- [183] 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.
- [184] 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>.
- [185] 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>.
- [186] Ramadana, M.A., Hasan, A.M., Taha, M.R. & Ibrahim, A., 2023. Tribological Properties of 3D Printed Polymers: PCL, ABS, PLA and Composites. *Tribology in Industry*, 45(1), pp.125–136.
- [187] 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
- [188] 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).
- [189] 3DJake България (n.d.) Смоли за 3D принтери [онлайн]. Достъпно на: <https://www.3djake.bg/смоли> (Accessed: June 2025).
- [190] 3DLarge (2021) Ръководство за материали за 3D принтиране: Пластмаси [онлайн]. Достъпно на: <https://3dlarge.com/blogs/3d-printirane-3d-printeri/rakovodstvo-za-materiali-za-3d-printirane-plastmasi> (Accessed: June 2025).
- [191] 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.
- [192] 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.
- [193] 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.
- [194] 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
- [195] 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
- [196] 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.
- [197] Gyoshev S., Stoimenov N, Paneva M., Determination of the friction coefficient of 3D printed materials - Part II - Sliding friction, 10th International Conference on Mechanical Technologies and Structural Materials (MTSM 2021), ISSN: 1847-7917, pp. 43-46, Split, Croatia, September 23-24, 2021, Croatian Society for Mechanical Technologies, Croatia
- [198] O'Connell, J. & Vicknair, A. (2024) '3D Printing Spheres: How to Do It', All3DP, 31 Dec. Retrieved 8 Sep. 2025, from <https://all3dp.com/2/3d-printing-spheres-tutorial/>
- [199] MDPI (2025) 'Understanding and Resolving 3D Printing Challenges: A Systematic Review', Processes, 13(6), p. 1772. DOI: 10.3390/pr13061772.
- [200] Lai, H., Gong, B., Yin, J., Qian, J., 3D printing topographic cues for cell contact guidance: a review, Materials & Design (2022), doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110663>
- [201] W. Oropallo, L.A. Piegl challenges in 3D printing Engineering with Computers. Eng. Comput., 32 (1) (2016), pp. 135-148, 10.1007/s00366-015-0407-0
- [202] All3DP (2024) FDM vs Resin 3D Printer: The Differences [online]. Available at: <https://all3dp.com/fdm-vs-sla/> (Accessed: March 2025).
- [203] Б. Попов, М. Панев, Н. Стоименов, Л. Клочков, Обзор и анализ на материали за 3d печат, XXVII МНТК, Автоматизация на дискретното производство „АДП – 2021“, Юни, Созопол, ISSN 2682-9584, стр. 218-221.
- [204] А. Христов, И. Стоянов, М. Велева, Г. Пачов, „Машина за 3D принтиране използваща FDM технология“, XXVII МНТК, Автоматизация на дискретното производство „АДП – 2018“, Юни, Созопол, ISSN – 13 10 -3946, 2018, стр. 318-323.
- [205] M. Savi, D. Villani, M.A.B. Andrade, O. Rodrigues, M.P.A. Potiens, „Study on attenuation of 3D printing commercial filaments on standard X-ray beams for dosimetry and tissue equivalence“, Radiation Physics and Chemistry, Volume 182, ISSN 0969-806X, 2021, 109365.
- [206] Miglena Paneva, Peter Panev, Gabriela Kotseva. Spheres modelling and extrusion by 3d additive technology XXXI International Scientific and Technical Conference, ADP - 2022., Sozopol, Bulgaria., Publishing house of TU-Sofia ISSN – 2682-9584, Publisher Department “Automation of Discrete Production Engineering“ Mechanical Engineering Faculty, Technical University – Sofia, 2021, pp. 253-258
- [207] 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
- [208] Kalat M., Ziai Y., Dziedzic K., Gradyś A., Urbański L., Zaszczyńska A, Lantada A., Kowalewski Z., Experimental evaluation of build orientation effects on the microstructure, thermal, mechanical, and shape memory properties of SLA 3D-printed epoxy resin,

European Polymer Journal, Volume 228, 2025, 113829, ISSN 0014-3057, <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2025.113829>.

- [209] J. António and P. Georgieva, "Iterative Stacking Regression for Materials Properties Prediction," 2024 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Yokohama, Japan, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/IJCNN60899.2024.10650753.
- [210] Lourenço R., Georgieva P., Cueto E., Andrade-Campos, A., An indirect training approach for implicit constitutive modelling using recurrent neural networks and the virtual fields method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Volume 425, 2024, 116961, ISSN 0045-7825, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2024.116961>
- [211] Rockwell Hardness Testing, [Last accessed May, 2025] - <https://www.hardnesstesters.com/test-types/rockwell-hardness-testing>
- [212] Digital Hardness Tester, Last accessed May, 2025 - <https://www.hardnesstesting-machine.com/Digital-Universal-Hardness-Tester-BRV-187-5T-Testing-Machine-With-Close-Loop-Load-Cell-pd49740224.html>
- [213] Rockwell Hardness Testing, [Last accessed May, 2025] - <https://www.buehler.com/blog/rockwell-hardness-testing/>
- [214] <https://www.tianxing.com.cn/uploadfile/202101/b3a46b115c.pdf> [Last accessed May, 2025]
- [215] Rockwell hardness testing laboratory, Last accessed May, 2025 - <https://filab.fr/en/our-services/our-expertise-services/mechanical-laboratory-test/laboratory-testing-and-measurement-of-rockwell-hardness/>
- [216] 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
- [217] Gyoshev S., Stoimenov N, Paneva M., Determination of the friction coefficient of 3D printed materials, International Conference “Mechanical Technologies and Structural Materials” Split, Croatia, ISSN 1847-7917, pp. 149-152, 2021.
- [218] J O Bird BSc, CEng, MIEE, CMath, FIMA, FCollP, MIEIE, P J Chivers BSc, PhD, in Newnes Engineering and Physical Science Pocket Book, 1993.
- [219] V.N. Malyshev, in Advances in Friction-Stir Welding and Processing, 201 Benjamin Silliman, Principles of Physics, Or Natural Philosophy, Ivison, Blakeman, Taylor & company publishers, 1871.
- [220] N. Ayilimis, 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.

- [221] 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.
- [222] Stoimenov N., Gyoshev S., Paneva M., Panev P., Determination of the friction coefficient of 3D printed materials - Part I - Rolling friction. 10th International Conference on Mechanical Technologies and Structural Materials (MTSM 2021), Croatian Society for Mechanical Technologies, ISSN:1847-7917, pp. 149-152, 2021.
- [223] 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
- [224] 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
- [225] 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
- [226] 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.uni-sofia.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.).

ДЕКЛАРАЦИЯ ЗА ОРИГИНАЛНОСТ

Декларирам, че дисертацията съдържа оригинални резултати, получени при проведени от мен научни изследвания с подкрепата и съдействието на научния ми ръководител. Резултатите, които са получени, описани и/или публикувани от други учени са коректно и подробно цитирани в библиографията. Настоящият дисертационен труд не е прилаган за придобиване на научна степен в друго висше училище, университет или научен институт.

Подпис:..... /маг.инж. Габриела Коцева/

Публикации по дисертационната тема

- [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] 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
- [3] 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
- [4] 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
- [5] Kotseva G., Stoimenov N., Kandeveva 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
- [6] 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
- [7] 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: Azbuki National Publishing House, pp. 40-53

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Обзор и дефиниции в трибологията

1. Въведение и дефиниции

Трибология (от гръцкото τριβω – „тръкам, трия“ и λόγος – „учение“) е науката и технологията за повърхности, намиращи се в относително движение, и за процесите, които възникват между тях [1].

Според широко приета дефиниция, трибологията включва три ключови области: триене, износване и смазване [2].

Друга дефиниция я определя като „наука и технология за взаимодействието между повърхности в относително движение и свързаните с това процеси и практики“ [3].

2. Основни елементи на трибологията

Триене (Friction) – съпротивление срещу относително движение между две тела в контакт [4].

Износване (Wear) – необратима загуба или деформация на материал на контактните повърхности вследствие на триене, плъзгане или удар [5].

Смазване (Lubrication) – въвеждане на междинен слой (течен, твърд или пластичен) между повърхностите с цел намаляване на триенето и износването [4].

Трибосистема (Tribosystem) – системата, включваща контактни повърхности, междинен слой, условия на натоварване, скорост, температура и околна среда [5].

3. Значение и икономически ефекти

Смята се, че в индустриализираните страни между 2 % и 7 % от БВП се губи в резултат на триене и износване [6].

Енергийните загуби, дължащи се на триенето, могат да достигнат до 20 % от общата енергия в транспортния и производствения сектор [7].

Приложенията на трибологията обхващат широк спектър – от машини и двигатели до медицински импланти, като оптимизацията на триенето е ключова за ефективност и дълготрайност [2].

4. Историческа справка

Терминът „tribology“ е въведен официално след публикуването на доклада на Peter Jost през 1966 г. („The Jost Report“), който обръща внимание на големите икономически загуби от триене и износване [8].

Въпреки това, трибологични принципи са били прилагани още в древен Египет, където са използвани масла за намаляване на съпротивлението при преместване на тежки каменни блокове [2].

5. Инженерно-технически аспект

Трибологията е интердисциплинарна наука, която обединява знания от механика, физика, химия, материалознание и инженерни технологии [5].

Триенето и износването не са материални свойства сами по себе си, а системни реакции, зависещи от натоварването, движението, температурата и условията на околната среда [9].

Проектирането на компоненти като лагери, зъбни колела и уплътнения изисква трибологичен подход за оптимизация на техните повърхностни взаимодействия [8].

6. Особености при полимери и композити

Полимерите и композитите имат специфични трибологични характеристики поради вискоеластичност, абсорбционни свойства и различна контактна механика в сравнение с металите [10].

Основни фактори, влияещи върху триенето на полимерите, са повърхностната свободна енергия, адхезията и температурата [11].

Комбинирането на полимери с пълнители, влакна или наночастици води до значително подобрене на трибологичните им свойства [12].

Таблица 1. Основни понятия и дефиниции в трибологията

Понятие	Дефиниция
Триене	Силата, която се противопоставя на относителното движение между две повърхности.
Износване	Процес на загуба или деформация на материал от контактните повърхности вследствие на триене или контакт.
Смазване	Метод за намаляване на триенето и износването чрез междинен слой между повърхностите.
Трибосистема	Система, включваща контактни повърхности, междинен слой, натоварване, движение и околна среда.
Полимерна трибология	Изучаване на триене и износване при полимери и композити.

Използвани източници:

1. AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology). (n.d.). What is Tribology? [online] Available at: <https://unit.aist.go.jp/cmt-ri/english/group/trib.htm>
2. [Accessed 28 Sep. 2025].
3. STLE (Society of Tribologists and Lubrication Engineers). (n.d.). What is Tribology? [online] Available at: https://www.stle.org/files/About_STLE/Tribology/files/What_is_tribology/Tribology.aspx
4. [Accessed 28 Sep. 2025].
5. GGB Bearings. (n.d.). Tribology Resources. [online] Available at: <https://www.ggbearings.com/en/resources/bearings-resources/tribology>
6. [Accessed 28 Sep. 2025].
7. Machinery Lubrication. (n.d.). Introduction to Tribology. [online] Available at: <https://www.machinerylubrication.com/tribology-31340> [Accessed 28 Sep. 2025].
8. GGB Bearings. (n.d.). What is Tribology? [online] Available at: <https://www.ggbearings.com> [Accessed 28 Sep. 2025].

9. GfT e.V. (German Society for Tribology). (n.d.). What is Tribology? [online] Available at: <https://www.gft-ev.de/en/what-is-tribology> [Accessed 28 Sep. 2025].
10. Wikipedia. (2025). Tribology. [online] Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tribology> [Accessed 28 Sep. 2025].
11. Brookes Bell. (2022). What is Tribology? [online] Available at: <https://www.brookesbell.com/news-and-knowledge/article/what-is-tribology-158358> [Accessed 28 Sep. 2025].
12. Bearing News. (n.d.). The Study of Interacting Surfaces in Motion. [online] Available at: <https://www.bearing-news.com/tribology-study-interacting-surfaces-motion> [Accessed 28 Sep. 2025].
13. Engineering at UNT. (2010). Overview of Polymer Tribology. [online PDF] Available at: <https://engineering.unt.edu/mse/research/labs/lapom/sites/default/files/polymtribojme2010.pdf> [Accessed 28 Sep. 2025].
14. Tribonet. (2023). Overview of Polymer Tribology. [online] Available at: <https://www.tribonet.org/news/advanced-materials/overview-of-polymer-tribology> [Accessed 28 Sep. 2025].
15. ScienceDirect. (2018). Advanced Polymer Composites in Tribology. [online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542504818300083> [Accessed 28 Sep. 2025].

Преглед на част от съществуващи системи за трибологични изследвания

В областта на трибологията съществуват разнообразни изпитвателни системи, които позволяват измерване на триене, износване и свързани параметри при различни условия на контакт, натоварване, движение и околна среда. По-долу са разгледани няколко значими типове системи и техни характеристики.

1.1 Основни типове изпитвателни системи

Системи тип pin-on-disc (игла-на-диск) и ball-on-disc (сфера-на-диск) са едни от класическите подходи за измерване на коефициент на триене и темпове на износване. [1]

Системи с реципрокиращо движение (reciprocating sliding rigs) позволяват симулация на плъзгащи контакти с обратно движение, което е типично за много приложения (напр. гуми, лагери). [2]

Универсални многофункционални трибометри („multi-function tribometers“) осигуряват комбинация от въртеливи и линейни движения, широк диапазон на натоварване, температурни и околни условия (вакуум, корозивна среда). [3]

Специализирани трибологични системи, предназначени за екстремни условия – висока/ниска температура, вакуум, корозивна среда, електрическо поле и др. [4]

1.2 Примери за конкретни системи

Производителят Rtec Instruments предлага линеен модул за изпитване „linear wear friction testing module“, който може да извършва тестове с осцилираща плъзгаща употреба, при натоварвания от няколко mN до няколко kN, при температури от –50 °C до 1200 °C. [5]

NANOVEA предлага настолни трибометри („benchtop tribometers“), модели T50 и T200, с модулност за „pin-on-disk, ball-on-disk, block-on-ring“ и възможности за контрол на температура, влажност и среда. [6]

Изследователската група на Southwest Research Institute (SwRI) използва системи като Bruker UMT-3 и TriboLab, които позволяват изпитвания за триене, износване, смазване, при температури до ~ 1000 °C, с множество сензори и условия (нагреване, влажност, електрически контакт). [7]

Университетът в Бохум („RUB“) описва изпитвателен стенд за абразивно износване (Rubber-Wheel ASTM G65) и трибокорозионен тестер UMT3, който съчетава плъзгане и корозия, с натоварвания 0,5-50 N, за изучаване на трибокорозионно поведение. [8]

1.3 Характеристики и параметри за избор

При подбора на изпитвателна система за конкретно изследване е важно да се отбележат параметри като: диапазон на натоварването, скорост на движение, вид движение (плъзгане, търкаляне, обратна), температура и среда (суха, смазана, корозивна), геометрия на контакт (игла-диск, блок-пръстен и др.). [2][3]

Съвременните системи имат интегрирани сензори за измерване на коефициент на триене, сила на натиск, износване (обем или маса), промяна на повърхностна топография (чрез 3D профилометър) и условия като температура, влажност. [5][7]

За материали като полимери и композити (които са обект на вашето изследване) е важно уредът да поддържа ниско натоварване, контрол на температура и скорост, и възможност за смазване или безсмазъчна среда — системи като описаните „benchtop tribometer“ или линейни осцилиращи модули са подходящи. [6]

Освен това, спецификата на 3D-отпечатаните материали (с възможни вътрешни кухини, ориентация на слоевете, пълнители) налага избор на тестова конфигурация, която позволява ясно установяване на контактната геометрия и контролиране на параметри – напр. блок-на-пръстен или Reciprocating Pin-on-Plate адаптери. [8]

Източници

1. Wikipedia. (n.d.). *Tribometer*. [online] Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tribometer> [Accessed 29 Sept. 2025].
2. Veluri, R. (2023). “Reciprocating Sliding Friction and Wear Test”. *About Tribology*. [online] Available at: <https://www.tribonet.org/news/general-topics/reciprocating-sliding-friction-and-wear-test/> [Accessed 29 Sept. 2025].
3. EWA Direct. (2024). “Analysis of the development of friction and wear testing machine based on complex working conditions”. *Proceedings of the 2nd International Conference on Mechatronics and Smart Systems*. [online] Available at: <https://direct.ewa.pub/proceedings/ace/article/view/12426> [Accessed 29 Sept. 2025].
4. RUB – Ruhr-University Bochum. (n.d.). “Tribology”. *Faculty of Mechanical Engineering – Materials Technology*. [online] Available at: <https://www.wtech.ruhr-uni-bochum.de/lwt/forschung/tribologie.html.en> [Accessed 29 Sept. 2025].
5. Rtec-Instruments. (n.d.). “Linear Wear Friction Testing on Rtec Tribometer”. [online] Available at: <https://rtec-instruments.com/tribometer/tribometer-applications/linear-wear-friction-testing-on-rtec-tribometer/> [Accessed 29 Sept. 2025].
6. NANOVEA. (n.d.). “Benchtop Tribometer for Wear & Friction Testing”. [online] Available at: <https://nanovea.com/ar/benchtop-tribometer/> [Accessed 29 Sept. 2025].

7. Southwest Research Institute. (n.d.). *Tribology Research and Evaluations*. [online] Available at: <https://www.swri.org/sites/default/files/brochures/tribology-research-and-evaluations.pdf> [Accessed 29 Sept. 2025].
8. Phoenix Tribology Ltd. (n.d.). “TE 99 Universal Wear Machine – Leaflet”. [online] Available at: <https://www.phoenix-tribology.com/at2/leaflet/te99> [Accessed 29 Sept. 2025].

Обработка на данни на трибологични изследвания

Обработката на експерименталните данни е ключов етап при трибологичните изследвания, тъй като осигурява надеждно определяне на параметрите на триене, износване и възстановяване, както и тяхното влияние върху поведението на изследваните материали.

Първоначално данните, получени от трибометъра (напр. сила на триене, време, натоварване, скорост), се експортират в цифров вид (обикновено формати CSV, TXT или Excel). Тези данни преминават през процес на филтриране на шум, корекция на нулеви отклонения и нормализация, за да се осигури тяхната достоверност. В съвременната практика се използват специализирани софтуерни платформи и статистически пакети за обработка, включително MATLAB, Python (NumPy, Pandas, SciPy), OriginPro и Excel Analysis ToolPak, чрез които се изчисляват средни стойности, стандартни отклонения и зависимости между параметрите.

Един от основните показатели е коефициентът на триене, изчисляван като отношение между тангенциалната сила и нормалната сила. При износващи тестове се изчислява интензитетът на износване (wear rate) по експериментални зависимости.

За да се анализира влиянието на различни фактори (материал, натоварване, скорост, температура), се използват многофакторни статистически методи – регресионен анализ, ANOVA, както и експлораторен анализ на данни (EDA), който позволява визуално откриване на зависимости и закономерности в набора от измервания (Malinowski et al., 2022).

В последните години се наблюдава тенденция към използване на т.нар. трибоинформатика (tribo-informatics) – интегриране на големи масиви от експериментални данни и машинно обучение за предсказване на трибологично поведение. Тези подходи позволяват създаване на бази данни, отговарящи на принципите FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable), което улеснява споделянето и сравняването на резултати между различни лаборатории (Garabedian et al., 2022; Yin et al., 2023).

При работа с композитни и 3D-отпечатани материали е особено важно да се анализират не само усреднените стойности, но и разпределенията на данните – например, вариации на коефициента на триене във времето, или корелации между слоевете на отпечатване и локалното износване. Визуализацията на резултатите чрез графики, топографски карти и диаграми (3D повърхостни профили) е съществена част от анализа и следва да бъде включена в докладите и приложенията.

Източници

1. Garabedian, N.T. et al. (2022) ‘Generating FAIR research data in tribology’, *Scientific Data*, 9, Article 141. [online] Available at: <https://www.nature.com/articles/s41597-022-01429-9> [Accessed 30 Sept. 2025].
2. Yin, N., Xing, Z., He, K. et al. (2023) ‘Tribo-informatics approaches in tribology research: A review’, *Friction*, 11, pp. 1-22. [online] Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40544-022-0596-7> [Accessed 30 Sept. 2025].
3. Malinowski, P., Kasińska, J., Rutkowski, S. & Madej, M. (2022) ‘Exploratory Data Analysis for the Evaluation of Tribological Properties of Wear-Resistant Surface Layers Modified with Rare-Earth Metals’, *Materials*, 15(6), 2032. [online] Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/6/2032> [Accessed 30 Sept. 2025].

Приложение 2

Обзор на технологиите за 3D печат

1. Въведение

В рамките на изследването на 3D отпечатани полимери и композити е полезно да се даде систематичен преглед на основните технологии за 3D печат, тяхната класификация, принципи на работа и приложимост. Това приложение обхваща технологиите, които са пряко или косвено свързани с изработката на проби за трибологично изследване.

Сравнителна таблица

Технология	Принцип на работа	Приложим материал	Предимства / бележки
FFF / FDM	Екструзия на термопластичен материал чрез нагрят дюз	PLA, ABS, PETG, композити с влакна	Най-разпространен, добре за пробни части
SLA / DLP	Полимеризация на фотополимерна смола чрез UV	Смоли	Висока резолюция, гладки повърхности
SLS / MJF	Сливане на прах чрез лазер или агенти	Нейлон, метал, композити	Без поддържащи структури, сложна геометрия
Binder Jetting	Нанасяне на свързващо вещество върху прах	Метал, керамика, полимер	Подходящо за цветни/керамични части
Sheet Lamination	Лепене/ултразвуково слепване на листови материали	Хартия, пластмаса, метал	По-малко използвано в инженерни приложения

4. Значение за трибологични изследвания

- При подготовка на проби за трибологични тестове е важно да се отчита технологията на печат, тъй като тя влияе на структурата (слойност, ориентация, вътрешни дефекти) и следователно на трибологичното поведение [1, 2].
- Например, при FFF/принт с влакна ориентацията на слоевете и наличието на интерфейси може да повлияе на коефициент на триене и износване [1].
- При технологии като SLS/MJF праховото легло създава различна повърхностна топография и вътрешни кухини, които имат значение за трибологията [3].
- Познаването на параметрите (слойова височина, скорости, температура на печат) подпомага систематичното сравняване между материали и технологии [4].

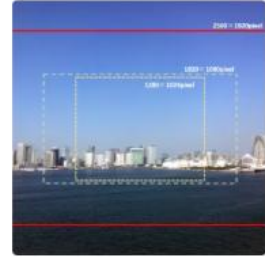
Таблица. 2 Използваните в дисертационния труд принтери и характеристиките им.

3D print technology	3D Printers	Software	Dimensions	Materials
<i>Material Extrusion</i>	 Tevo Tornado	Ultimaker Cura	300 X 300 X 400 mm	Plastics (ABS , PLA, PETG, TPU, HIPS, FLEX, SteelFill)
<i>Material Extrusion</i>	 Bambu Lab	Ultimaker Cura	256 x256 x 256 mm	Plastics (ABS , PLA, PETG, TPU, HIPS, FLEX, SteelFill)
<i>Material Extrusion</i>	 Ultimaker S5	Ultimaker Cura	330 x240 x 300 mm	Plastics (ABS , PLA, PETG, TPU, HIPS, FLEX, SteelFill)
<i>Material Jetting –PolyJet</i>	 Stratasys Objet260 Connex3	Objet Studio	255 x252 x 200 mm	Agilus30 Family Biocompatible Dental Materials Digital ABS Plus High Temperature Rigur and Durus Tango Transparent Vero Family SUP705, SUP706 Support
<i>ColorJet Printing (CJP)</i>	 ProJet® 460P lus	Print3D App-	203 x254 x 203 mm	VisiJet® PXL™
<i>Vat Polymerization</i>	 Anycubic Photon M3 MAX	control from tablet, comp	300 × 298 × 164 mm	UVResin, Photopolymer resin SLA 3D printer resin, Basic UV Resin, Water-Wash Resin+, ABS-Like Resin, High Clear Resin, High Speed Resin,

NAC Memrecam HX-3 / HX-5 / HX-6

High-definition video

High-speed data recording of 2,000 frames per second with **5 million pixels** (2,560 x 1,920 pixels) and 4,500 frames per second (HX-3) with full HD image quality, and highly accurate data from unprecedented high-definition video is now available. Also, if you use the WINDOW MOVE function, you can specify the shooting location in the effective shooting area and display it in the center of the screen, making it easy to fine-tune the camera during magnified shooting.



High speed photography

The maximum speed of the high speed camera MEMREMCAM HX series varies depending on the model. You can select the most suitable model according to the speed band you use. You can capture high-speed phenomena from low-speed areas to high-speed areas with high image quality.

Maximum speed of each model

- HX-3: 1,300,000 frames / sec
- HX-5: 900,000 frames / sec
- HX-6: 650,000 frames / sec

High Speed Camera NacMemrecam HX6



NAC's Memrecam HX-6 offers an astounding 5 MegaPixel resolution at up to 1,000 fps, Full HD resolution at up to 2,330 fps, 1 MegaPixel resolution at up to 4,600 fps, and much more. The HX-6 gives the user the best possible solutions: the highest resolutions available; the highest light sensitivity available; and ultra fast imaging.

ImagingFormats	Maxfps @ Format
HighDef: 16 X 9	
1920 X 1080	2,330
1280 X 720	5,110
OtherFormats	
4 MegaPixel	1,200
2 MegaPixel	2,370
1 MegaPixel	4,610
XGA (1024X768)	5,890
768 X 576	10,110
VGA (640X480)	14,150
512 X 512	16,200
512 X 384	21,500
320 X 320	37,170
320 X 240	52,900
320 X 192	65,350
320 X 96	123,440
320 X 48	222,200
320 X 24	370,330

