MINISTERUL EDUCAŢIEI
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA Bucureşti

Școala Doctorală de
Inginerie Industrială și
Robotică

Cosmina Gh. CHIUJDEA

TEZĂ DE DOCTORAT

Studiul comportamentului triboelectric al suprafețelor polimerice obținute prin imprimare 3D

Conducător științific,
Prof.dr.ing. Sorin Cănănău (POLITEHNICA București)

- 2025 -

Cuprins

Introducere ..... - 2 -
Partea I. Stadiul actual al cercetărilor în domeniu ..... - 4 -
Capitolul 1. Tehnologii aditive ..... - 4 -
1.1. Ce sunt tehnologiile aditive? ..... - 4 -
1.2. Principalele etape in procesul de fabricatie prin adaugare de material ..... - 5 -
Domenii de aplicare ..... - 6 -
1.3. Avantaje si dezavantaje ..... - 6 -
1.3.1. Avantaje ..... - 6 -
1.4.2. Dezvantaje ..... - 8 -
1.4. Clasificare ..... - 8 -
Capitolul 2. Tribostatica ..... - 11 -
2.1. Stadiul actual al cercetării ..... - 11 -
2.2. Încărcarea prin efect triboelectric ..... - 12 -
Capitolul 3. Concluzii privind stadiul actual al cercetărilor în domeniu ..... - 13 -
Partea a II-a. Contribuții la studiul comportamentului triboelectric al suprafeţelor polimerice obţinute prin imprimare 3D ..... - 14 -
Capitolul 4. Direcţiile, obiectivul principal şi metodologia de cercetare-dezvoltare ..... - 14 -
4.1. Direcţii de cercetare-dezvoltare ..... - 14 -
4.2. Obiectivul principal al activităţii de cercetare-dezvoltare ..... - 14 -
4.3. Metodologia de cercetare-dezvoltare ..... - 14 -
4.4. Materiale și metode ..... - 15 -
4.5. Rezultate și discuții ..... - 22 -
4. Concluzii ..... - 25 -
Capitolul 5. Concluzii finale şi contribuţii principale ..... - 26 -
5.1. Concluzii finale ..... - 26 -
5.2. Contribuții principale ..... - 26 -
5.3. Importanța tezei ..... - 26 -
5.4. Perspective viitoare ..... - 27 -
Bibliografie ..... - 28 -

Introducere

În ultimele decenii, tehnologiile de fabricație aditivă (Additive Manufacturing – AM) au cunoscut o dezvoltare remarcabilă, fiind percepute drept soluții de generație viitoare pentru numeroase provocări ale industriei moderne. Aceste tehnologii răspund unor cerințe fundamentale ale mediului economic actual: reducerea costurilor și a timpilor de producție, posibilitatea realizării unor geometrii complexe, flexibilitatea ridicată a proceselor, precum și contribuția la sustenabilitate prin utilizarea eficientă a materialelor . Totodată, AM facilitează personalizarea produselor și integrarea rapidă a inovațiilor în ciclul de fabricație, aspecte care consolidează rolul lor în tranziția către Industria 4.0.

Cu toate acestea, adoptarea pe scară largă a tehnologiilor AM se confruntă încă cu o serie de provocări tehnico-științifice, printre care se numără limitările în ceea ce privește paleta de materiale disponibile, costurile ridicate ale echipamentelor, precum și calitatea suprafețelor obținute. Dintre acestea, calitatea suprafeței reprezintă un factor critic, influențând direct atât precizia dimensională, cât și performanțele funcționale ale produselor obținute .

În paralel, interesul pentru utilizarea polimerilor în aplicații energetice și electrostatice a crescut semnificativ. Materiale precum PLA, datorită caracterului lor sustenabil și biodegradabil, reprezintă o opțiune atractivă pentru dezvoltarea de dispozitive bazate pe efectul triboelectric, precum nanogeneratoarele triboelectrice (TENGs). În acest context, textura suprafeței materialului are un rol determinant în procesul de triboîncărcare, influențând nivelul și distribuția sarcinii electrice generate .

Astfel, necesitatea și importanța prezentei teze rezidă în abordarea interdisciplinară a două domenii emergente – fabricația aditivă și triboelectricitatea – prin investigarea influenței texturării suprafețelor obținute prin imprimare 3D asupra procesului de încărcare triboelectrică. Rezultatele obținute pot contribui atât la optimizarea proceselor AM, cât și la dezvoltarea de aplicații inovatoare în domeniul energetic și al dispozitivelor autoalimentate.

Teza este structurată pe mai multe capitole, care urmează o logică progresivă de la fundamente teoretice la rezultate experimentale și concluzii:

- Capitolul 1 – Aspecte generale privind tehnologiile de fabricație aditivă – prezintă evoluția, clasificarea și domeniile de aplicare ale tehnologiilor AM, precum și avantajele și limitările acestora.
- Capitolul 2 – Calitatea suprafețelor obținute prin AM și rolul lor în aplicații industriale – analizează factorii care influențează morfologia suprafeței și impactul asupra performanțelor funcționale.

- Capitolul 3 – Stadiul actual al cercetărilor privind fenomenele triboelectrostatice – sintetizează literatura de specialitate cu privire la efectul triboelectric, nanogeneratoarele triboelectrice și rolul texturării suprafeței.
- Capitolul 4 – Direcțiile, obiectivul principal și metodologia de cercetare-dezvoltare – formulează direcțiile de cercetare actuale, stabilește obiectivul principal al tezei și descrie metodologia propusă pentru atingerea acestuia.
- Capitolul 5 – Rezultate experimentale și interpretarea acestora – prezintă detaliat investigațiile efectuate asupra probelor polimerice imprimate 3D, cu accent pe influența texturării suprafeței asupra procesului de triboîncărcare, analiza comparativă a diferitelor tipuri de texturi și discuția rezultatelor obținute.

Partea I. Stadiul actual al cercetărilor în domeniu

Capitolul 1. Tehnologii aditive

1.1. Ce sunt tehnologiile aditive?

De-a lungul timpului, companiile au acordat o atenție prioritară gestionării resurselor materiale, financiare, tehnologice și umane. Dacă în trecut accentul principal era pus pe controlul strict al costurilor, al materiilor prime și al utilajelor, astăzi, într-un mediu profund globalizat și extrem de competitiv, organizațiile recunosc importanța capitală a unor factori suplimentari. Printre aceștia se numără calitatea produsului, nivelul de competitivitate al prețului, rapiditatea și siguranța livrării, flexibilitatea proceselor interne, precum și menținerea unui ritm susținut de inovare. Astfel, avantajul competitiv nu mai este definit doar de resursele deținute, ci și de capacitatea de a implementa tehnologii avansate și de a răspunde prompt cerințelor pieței.

Adoptarea unor tehnologii moderne în procesele de producție generează o serie de efecte benefice, dintre care se pot evidenția următoarele:

- creșterea preciziei de execuție și menținerea acesteia pe toată durata desfășurării proceselor, ceea ce facilitează optimizarea fabricației și obținerea unor produse de înaltă calitate;
- ridicarea gradului de automatizare și informatizare a liniilor de producție, fapt ce permite monitorizarea în timp real a parametrilor tehnologici și intervenția rapidă în caz de abateri;
- sporirea productivității muncii, atât prin reducerea timpilor morți, cât și prin utilizarea mai eficientă a resurselor umane și materiale;
- creșterea constantă a nivelului de calitate al produselor industriale, ceea ce consolidează încrederea clienților și facilitează accesul pe piețe internaționale exigente.

Parte esențială a procesului de producție, sistemul de fabricație include ansamblul activităților prin care materia primă este transformată într-un produs finit sau într-un produs intermediar utilizabil în alte etape ale lanțului tehnologic. O clasificare a tehnologiilor de fabricație, cunoscute și utilizate în prezent, poate fi structurată astfel:

a) Tehnologii de prelucrare prin îndepărtare de material

b) Tehnologii de prelucrare prin redistribuire de material sustenabilității industriale.

c) Tehnologii de fabricare rapidă a prototipurilor (Rapid Prototyping – RP) și de fabricație aditivă (Additive Manufacturing – AM) – această categorie se distinge fundamental de primele două, prin faptul că utilizează un principiu diferit: piesa este obținută prin adăugarea de material exact acolo unde este necesar, în cantitatea necesară. Prin aceste tehnologii se realizează direct un produs fizic, un prototip sau chiar o piesă finală, pornind de la un model digital 3D. Această abordare deschide noi perspective în inginerie, deoarece permite personalizarea produselor,

fabricarea de geometrii complexe imposibil de realizat prin metode convenționale, precum și reducerea timpului de lansare pe piață.

În concluzie, trecerea de la tehnologiile tradiționale de prelucrare la cele moderne, bazate pe fabricația aditivă, reflectă o schimbare de paradigmă în domeniul producției industriale. Companiile care reușesc să integreze eficient aceste tehnologii în fluxurile lor de fabricație beneficiază de o flexibilitate sporită, costuri optimizate și o capacitate ridicată de inovare, elemente decisive pentru competitivitatea pe termen lung.

Denumita pe scurt AM, principiul de baza al acestei tehnologii este acela ca un model, generat initial utilizand un sistem tridimensional de proiectare asistata de computer (3D CAD), poate fi fabricat fara a fi nevoie de planificarea proceselor. Desi in realitate acest lucru nu este atat de simplu pe cat suna, tehnologia AM simplifica cu siguranta procesul de productie a obiectelor complexe direct din datele CAD. Alte procese de fabricatie necesita o analiza atenta si detaliata a geometriei piesei pentru a determina lucruri precum ordinea in care pot fi fabricate diferite caracteristici, ce instrumente si procese trebuie utilizate si ce dispozitive suplimentare pot fi necesare pentru a finaliza piesa. In schimb, AM are nevoie doar de unele dimensiuni de baza si o intelegere a modului in care functioneaza masina AM si a materialelor utilizate.

1.2. Principalele etape in procesul de fabricatie prin adaugare de material

Toate tehnologiile AM implica o serie de pasi pentru trecerea de la modelul CAD la rezultatul fizic. Diferite produse vor implica AM in moduri diferite si in grade diferite. Produsele mici, relativ simple, pot folosi AM doar pentru modele de vizualizare, in timp ce produsele mai mari si mai complexe pot implica AM in numeroase etape si iteratii pe tot parcursul procesului de dezvoltare. Mai mult, etapele timpurii ale procesului de dezvoltare a produsului pot necesita doar piese nefinisate, AM fiind utilizat datorita vitezei cu care pot fi fabricate. In etapele ulterioare ale procesului, piesele pot necesita postprocesare atenta (inclusiv slefuirea, pregatirea suprafetei si vopsirea) inainte de a fi utilizate, AM fiind util aici datorita complexitatii formei care poate fi creata. Majoritatea proceselor AM implica, intr-o oarecare masura, urmatorii opt pasi.

- Etapa 1: Obtinerea modelului CAD
- Etapa 2: Conversia in format STL
- Etapa 3: Transferul fisierului pe masina AM
- Etapa 4: Configurarea masinii
- Etapa 5: Construirea piesei
- Etapa 6: Indepartarea piesei
- Etapa 7: Postprocesare
- Etapa 8: Utilizare

Domenii de aplicare

Tehnologiile de fabricație aditivă (AM) dobândesc un număr din ce în ce mai mare de domenii de aplicare, odată cu maturizarea proceselor și diversificarea materialelor compatibile. Dacă la început AM era utilizată aproape exclusiv pentru realizarea de prototipuri vizuale sau funcționale, în prezent aria de utilizare s-a extins considerabil, incluzând atât producția de piese unicat, cât și fabricarea de serii mici sau chiar medii de componente funcționale.

Unul dintre instrumentele de referință în analiza evoluției și adoptării acestor tehnologii îl reprezintă Raportul Wohlers, care oferă anual o evaluare la nivel mondial a pieței și a aplicațiilor AM. Conform Raportului Wohlers din 2018, distribuția domeniilor de utilizare pentru AM este prezentată în figura 1.4, datele evidențiind o tendință clară de diversificare și consolidare a rolului acestor tehnologii în industrie.

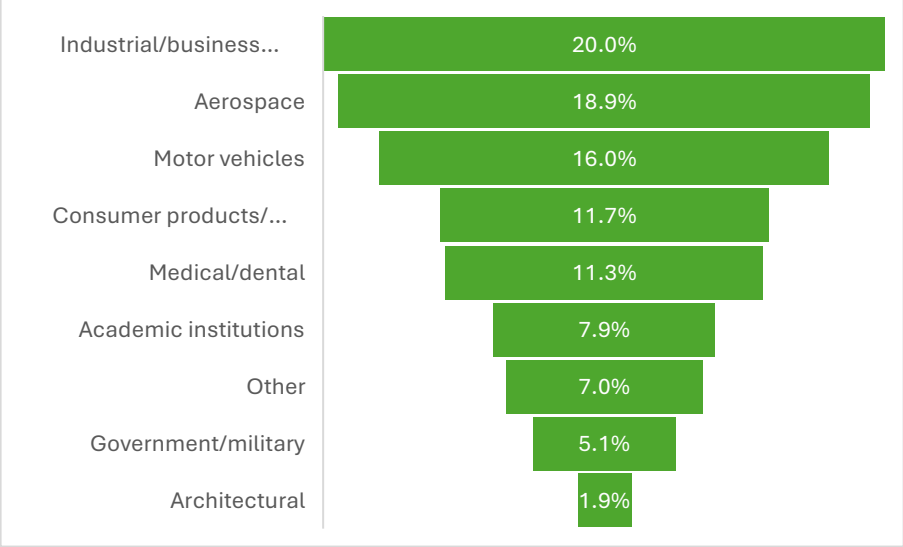


Fig. 1.4. Domeniile de aplicare ale AM

1.3. Avantaje si dezavantaje

1.3.1. Avantaje

Complexitatea geometriilor

Unul dintre cele mai evidente și importante avantaje ale tehnologiilor de fabricație aditivă este libertatea aproape nelimitată în realizarea formelor și a geometriilor complexe. În cazul prelucrării tradiționale subtractive, există întotdeauna constrângeri impuse de tehnologia utilizată – fie că este vorba de turnare, forjare sau prelucrare prin așchiere. Aceste metode implică unelte și scule fizice care limitează dimensiunile, unghiurile de acces sau posibilitatea de realizare a unor cavități interne complicate. Prin urmare, capacitatea de creație a proiectantului este inevitabil restrânsă de factori tehnologici și de costuri.

Reducerea numarului de piese dintr-un subansamblu

Un alt avantaj major al fabricației aditive constă în posibilitatea de a integra într-o singură piesă funcționalitatea care, în cazul prelucrării tradiționale, ar necesita realizarea și asamblarea mai multor componente distincte. Datorită faptului că procesul aditiv nu este constrâns de limitări geometrice, proiectantul are libertatea de a concepe structuri complexe, cu canale interne, articulații sau zone cu rigidități diferite, care pot îndeplini simultan rolurile mai multor piese clasice.

Micsorarea greutatii pieselor si subansamblelor

Fabricația aditivă permite conceperea pieselor cu structuri interne complexe, precum goluri, rețele de tip fagure sau forme reticulare, imposibil de realizat prin metode convenționale. Acestea reduc semnificativ masa componentelor, fără a compromite rezistența lor. În plus, prin combinarea funcționalităților mai multor piese într-o singură componentă, greutatea subansamblelor se diminuează și mai mult.

Costuri reduse

In majoritatea cazurilor, tehnologiile aditive vor reduce, de asemenea, costurile si cheltuielile in mai multe moduri. In primul rand costurile de energie pentru operatiile masinilor sunt, in general, scazute, mai ales atunci cand se ia in considerare procesul de revenire rapida a productiei. Tehnologia de imprimare 3D ajuta si la reducerea costurilor materialelor si a fortei de munca. Dar, cel mai important, ofera masuri de atenuare a riscurilor atunci cand vine vorba de fluxul de lucru in fabricatie. Prin utilizarea tehnologiilor aditive pentru prototipuri rapide, intreprinderile pot observa si repara modele inainte de a le trimite pentru productia finala. Acest lucru reduce foarte mult riscul cheltuielilor inutile in timpul procesului de productie.

Personalizare

Unul dintre punctele forte ale acestor tehnologii este abilitatea de personalizare in masa. Deoarece componentele tiparite 3D sunt produse in general unul cate unul, acest lucru ii ofera designerilor si intreprinderilor abilitatea de a modifica sau personaliza produsele pe care le considera potrivite. (Exemplu proteze medicale)

Executie integrala a pieselor in cadrul firmei producatoare

Un alt avantaj al fabricației aditive îl constituie posibilitatea realizării complete a pieselor direct în cadrul firmei producătoare. Spre deosebire de producția subtractivă (PS), unde numeroase etape ale ciclului de fabricație sunt externalizate – cum ar fi turnarea, tratamentele termice sau prelucrările speciale – în cazul AM întreaga piesă poate fi produsă local, utilizând

doar echipamentul de imprimare 3D și materialul de bază.

1.4.2. Dezvantaje

Materiale limitate

Unul din motivele pentru care tehnologiile aditive nu sunt intotdeauna potrivite pentru productia finala se datoreaza limitarilor in alegerea materialelor. Deoarece aceste obiecte sunt construite in straturi, vor rezulta parti mai slabe si mai putin dense in comparatie cu frezarea CNC sau turnarea prin injectie. Cu toate acestea, industria continua sa avanseze la fel cu gasirea unor noi materiale.

Dimensiuni limitate

Capacitatile de dimensiuni sunt limitate la volumul de construire al imprimantei, ceea ce inseamna ca nu se poate printa dincolo de limitele prestabilite.

Precizia

Daca se doreste producerea unor piese care necesita precizie ridicata, tehnologiile aditive trebuie folosite cu atentie. Multe materiale vor fi imprimate intr-o marja eronata de +/- 0,1 mm in precizie. Industria de imprimare 3D continua sa avanseze in aceasta privinta, dar este nevoie de o asigurare in ceea ce priveste verificarea preciziei unei masini inainte de a investi intr-o imprimanta sau serviciu 3D industrial.

Limitarile de productie

Desi imprimarea 3D are o valoare incontestabila in aplicatiile de prototipare rapida, exista limite flagrante atunci cand vine vorba de fabricarea dincolo de aceasta. In timp ce tehnologiile aditive pot contribui la economisirea de bani pentru prototipuri si productii pe termen scurt, aceste avantaje se transforma in dezavantaje in ceea ce priveste productia in masa. Cu tehnici precum turnarea prin injectie si termoformarea, oferind solutii mai rapide si mai ieftine pentru produsele finale, imprimarea 3D nu a atins inca acest nivel de potential.

1.4. Clasificare

Exista numeroase modalitati de clasificare a tehnologiilor AM. O abordare populara este clasificarea in functie tipul procesului, dupa cum este reprezentat in fig. 1.10



Fig. 1.10. Clasificarea tehnologiilor AM in functie tipul procesului

Fotopolimerizarea are loc atunci cand o rasina fotopolimerica lichida este expusa la o lumina cu o anumita lungime de unda si sufera o reactie chimica pentru a deveni solida. O serie de tehnologii aditive utilizeaza acest fenomen pentru a construi, strat cu strat, un produs solid. Principalele tehnologii din aceasta categorie sunt stereolitografia (SLA) utilizand fie lasere, fie DLP-uri (Digital Light Processing) si tehnologia CLIP (Continuous Liquid Interface Production)

Stereolitografia (SLA) este un proces prin care un obiect este creat prin tratarea selectiva a rasinii polimerice-strat cu strat cu ajutorul unui fascicul laser cu raze ultraviolete (UV). Materialele folosite in SLA sunt polimerii fotosensibili termosetati care vin in forma lichida. SLA este renumit pentru a fi prima tehnologie de imprimare 3D: inventatorul sau a patentat tehnologia in 1986. Daca sunt necesare parti cu precizie foarte mare sau finisare fina a suprafetei, SLA este cea mai rentabila tehnologie de imprimare 3D disponibila. Cele mai bune rezultate sunt obtinute atunci cand designerul profita de beneficiile si limitarile procesului de fabricatie. SLA utilizeaza o platforma de constructie scufundata intr-un rezervor translucid, umplut cu rasina fotopolimerica lichida. Odata ce platforma de constructie este scufundata, un laser cu un singur punct situat in interiorul masinii marcheaza o zona de sectiune transversala (strat) a piesei prin fundul rezervorului solidificand materialul. Dupa ce stratul a fost marcat si solidificat de laser, platforma se ridica si permite un nou strat de rasina sa curga sub partea respectiva. Acest proces este repetat strat cu strat pentru a produce o parte solida finala. Partile sunt in mod tipic apoi ulterior tratate cu lumina UV pentru a-si imbunatati proprietatile mecanice. Procedeul este un exemplu tipic de prelucrare strat cu strat si bazat pe polimerizarea unui lichid. Dupa solidificarea unui strat, piesa este scufundata cu o noua grosime de sectiune a polimerului si o noua sectiune transversala a piesei este solidificata. Intregul ciclu este repetat pana ce piesa este solidificata in totalitatea ei

Extrudarea termoplastică (FDM – Fused Deposition Modelling) reprezintă una dintre cele mai răspândite tehnologii de fabricație aditivă, aparținând familiei de procese bazate pe extrudarea materialelor. Principiul său de funcționare constă în utilizarea unui filament realizat din polimeri termoplastici, care este încălzit până la o temperatură situată la câteva grade sub punctul de topire și apoi extrudat printr-o duză cu diametru foarte redus, cuprins de obicei între 0,12 și 0,15

mm. Materialul topit este depus pe o platformă de construcție, duza fiind ghidată de un sistem de poziționare numeric controlat, care se deplasează în planul XOY pentru a realiza conturul și umplerea stratului curent. Prin repetarea acestei operații strat cu strat, obiectul tridimensional este construit conform geometriei definite de modelul digital CAD.

Tehnologia MJ (Material Jetting) reprezintă o metodă avansată de fabricație aditivă, care se bazează pe principiul pulverizării controlate a materialului lichid, urmată de solidificarea acestuia strat cu strat. Din punct de vedere conceptual, procesul este similar cu funcționarea unei imprimante cu jet de cerneală bidimensionale, însă, în locul cernelei, se utilizează materiale polimerice sau compozite lichide, capabile să fie întărite prin expunere la radiații ultraviolete (UV). În acest mod, modelul tridimensional este construit prin depuneri succesive de straturi subțiri, fiecare dintre ele fiind imediat solidificat pentru a asigura coeziunea cu stratul precedent.

Procesul începe cu distribuirea materialului prin intermediul unor duze de mare precizie, care se deplasează orizontal deasupra platformei de construcție, depozitând picături microscopice de material conform geometriei stratului curent. Picăturile sunt apoi expuse la o sursă de radiație UV, ceea ce determină polimerizarea instantanee și transformarea materialului din stare lichidă în stare solidă. Acest mecanism de solidificare rapidă permite obținerea unor suprafețe netede și a unor detalii fine, depășind adesea rezoluția altor tehnologii de fabricație aditivă.

Pulverizarea de nano-paricule (NPJ - Nano particle jetting) foloseste un lichid, care contine nanoparticule metalice sau nanoparticule suport, incarcate in imprimanta ca un cartus si introduse pe tava de constructie in straturi extrem de subtiri de picaturi. Temperaturile ridicate din interiorul invelisului de constructie determina evaporarea lichidului lasand in urma parti metalice. Imprimantele cu jet de material **Drop-On-Demand (DOD)** au doua jeturi de imprimare: unul pentru depunerea materialelor de constructie (de obicei un lichid asemanator cu ceara) si altul pentru materialul suport dizolvabil. Similar tehnicilor AM traditionale, imprimantele DOD urmeaza o cale predeterminata si depun materialul in mod punctual pentru a construi aria sectiunii transversale a unei componente. Aceste masini folosesc, de asemenea, un stergator care acopera zona de constructie dupa fiecare strat pentru a asigura o suprafata perfect plana inainte de a imprima urmatorul strat.

Procedeele de sinterizare/topire a pulberilor include urmatoarele tehnici de imprimare utilizate in mod obisnuit: sinterizarea selectiva metalica directa (DMLS), topirea cu fascicul de electroni (EBM), topirea selectiva cu laser (SLM) si sinterizarea selectiva cu laser (SLS). Aceste metode utilizeaza fie un fascicul de laser, fie un fascicul de electroni pentru a topi si a uni materialul in forma de pulbere impreuna. Procedeul de topire cu fascicul de electroni (EBM) necesita un vid, dar poate fi utilizat cu metale si aliaje in crearea unor piese functionale. Toate procesele de sinterizare/topire implica raspandirea materialului pulverulent pe straturile anterioare. Exista mecanisme diferite care sa permita acest lucru, inclusiv o rola sau o lama.

Tehnologia LOM (Laminated Object Manufacturing) se bazează pe un proces de construcție stratificat, în care fiecare strat al piesei este realizat prin depunerea succesivă de folii subțiri de material, cum ar fi hârtie special tratată, aluminiu sau materiale compozite. Aceste folii sunt suprapuse și lipite între ele prin intermediul unui strat adeziv termoactiv, care se activează sub acțiunea unei role încălzite. După lipire, conturul exterior și eventualele goluri interioare corespunzătoare fiecărui strat sunt decupate cu ajutorul unui fascicul laser sau, în unele cazuri, printr-un sistem mecanic de tăiere controlat numeric.

Procesul de fabricație debutează cu transformarea modelului tridimensional într-o succesiune de secțiuni bidimensionale, obținute printr-un procedeu de secționare pe direcția axei Z. Aceste secțiuni reprezintă planurile de referință pentru decuparea fiecărui strat în parte, iar suprapunerea și lipirea lor succesivă permit reconstruirea obiectului tridimensional. Un element particular al tehnologiei LOM, care o diferențiază de alte metode de fabricație aditivă, este faptul că la fiecare etapă se depune întreaga suprafață a stratului de material, nu doar zona corespunzătoare conturului piesei. Materialul rămas în afara conturului nu este îndepărtat imediat, ci este păstrat până la finalizarea procesului, unde joacă un rol de suport pentru straturile superioare.

Capitolul 2. Tribostatica

Electrificarea prin contact, sau electricitatea statică, este procesul prin care se generează sarcini electrice la suprafața unor diferite materiale atunci când acestea intră în contact și apoi sunt separate [1–6]. Triboincarcarea, un tip specific de electrificare prin contact, are loc prin interacțiuni de frecare și joacă un rol semnificativ în numeroase procese tehnologice și industriale. Spre deosebire de simpla electrificare prin contact, care apare doar prin contact și separare, triboincarcarea implică frecare mecanică, ceea ce duce la o acumulare mai mare de sarcină datorită contactului repetat și aportului de energie mecanică. Magnitudinea triboincarcării depinde de mulți factori, cum ar fi umiditatea, temperatura ambiantă, viteza de impact, densitatea fluxului și compoziția materialului [7–11].

2.1. Stadiul actual al cercetării

Încărcarea prin efect triboelectric este un fenomen de suprafață complex, a cărui înțelegere nu este încă pe deplin stăpânită. Cercetătorii care au studiat acest fenomen au obținut uneori rezultate contradictorii. Cu toate acestea, este incontestabil că efectul triboelectric depinde de

numeroși factori: natura frecării, temperatura obiectelor aflate în contact, starea de suprafață a eșantioanelor și umiditatea ambiantă par a avea cea mai mare influență asupra sarcinii generate.

Tribologia este studiată sub trei aspecte: frecarea (adică rezistența la mișcarea aplicată), uzura care provoacă pierderea de material și lubrifierea, care constă în interpunerea unui fluid între cele două corpuri aflate în contact.

Utilizarea polimerilor în contactele cu alunecare nu trebuie să ignore efectul triboelectric. Din cauza frecării cu un alt material, suprafața polimerului generează sarcini statice care se pot acumula în timpul ciclurilor de frecare continuă, până când ating o anumită valoare de saturație, fără a se putea evacua ușor către sol, așa cum se întâmplă în cazul metalelor. Repartizarea inegală a acestei sarcini depinde de tipul de frecare și se poate extinde dincolo de zona de contact. Acest lucru afectează într-o anumită măsură comportamentul la uzură al polimerilor supuși frecării uscate. Un contact continuu între polimeri va genera o sarcină electrică la nivelul suprafețelor lor, iar la aceasta se adaugă un coeficient redus de conductivitate, ceea ce nu favorizează disiparea căldurii și va duce la o creștere a temperaturii polimerilor. Temperatura locală la interfață poate fi semnificativ mai mare decât cea a mediului ambiant și poate fi de asemenea amplificată la nivelul contactelor dintre asperități prin „flash-uri" sau „puncte fierbinți" tranzitorii. În consecință, temperatura exercită o influență asupra uzurii polimerilor [50].

Tribologia polimerilor este studiul interacțiunilor dintre suprafețele în alunecare, care sunt, de regulă, în contact cu un lubrifiant. A fost intens studiată începând cu mijlocul secolului al XX-lea și continuă să fie un subiect de interes. Este important să se recunoască natura multidisciplinară a tribologiei, care implică cunoștințe din știința materialelor, chimia și fizica suprafețelor, mecanica solidelor și a suprafețelor, termică, termodinamică și termochimie.

2.2. Încărcarea prin efect triboelectric

Încărcarea prin efect triboelectric, sau prin frecare, este fenomenul care descrie un transfer de sarcină între două obiecte electric neutre, care sunt frecate unul de altul sau pur și simplu puse în contact (Figura 5). În urma acestui proces, cele două corpuri vor avea sarcini electrice de semne opuse. Sarcina rezultată persistă după separarea corpurilor, iar un nou contact generează un nou transfer de sarcină.

Sarcina triboelectrică este dificil de anticipat, din cauza complexității factorilor care o influențează, cum ar fi: natura materialelor, rugozitatea acestora, presiunea și viteza relativă, temperatura și umiditatea mediului ambient.

Prima referință științifică la fenomenul de triboelectrificare este atribuită lui Thales din Milet (640–546 î.Hr.), care a frecat chihlimbarul cu diverse materiale, precum mătase, blană de pisică sau lână, apoi a folosit chihlimbarul încărcat electrostatic pentru a atrage alte materiale ușoare, cum ar fi fire, paie, fân, frunze uscate, pene și puf.
Efectul triboelectric poate fi explicat prin mai multe mecanisme fizice, care decurg din transferul de electroni, ioni sau materie existentă la nivelul contactului.
Cantitatea de sarcină transferată crește, în general, odată cu:

- rugozitatea contactului
- suprafața de contact
- viteza de contact

Capitolul 3. Concluzii privind stadiul actual al cercetărilor în domeniu

Tehnologiile de fabricație aditivă (AM) au evoluat rapid de la prototipare la soluții industriale complexe, cu aplicații în domenii variate. Totuși, ele prezintă limitări importante, precum costuri ridicate, viteză redusă de fabricație, volum limitat și diversitate restrânsă a materialelor, dar și probleme privind calitatea suprafețelor.

Calitatea suprafeței este un factor critic, influențând atât aspectul și precizia dimensională, cât și proprietăți funcționale precum rezistența mecanică și performanța electrostatică. Din acest motiv, se caută metode de optimizare a texturii direct în procesul AM, pentru a reduce dependența de post-procesare.

În paralel, triboelectricitatea a devenit un domeniu de mare interes, odată cu dezvoltarea nanogeneratoarelor triboelectrice (TENGs), capabile să transforme energia mecanică ambientală în energie electrică. Performanța acestora depinde de materialele utilizate și de topografia suprafețelor în contact. Rugozitatea și geometria texturii influențează direct sarcina generată și stabilitatea ei.

Îmbinarea dintre AM și triboelectricitate deschide noi direcții de cercetare: realizarea de suprafețe texturate controlat prin imprimare 3D permite optimizarea procesului de triboîncărcare, oferind precizie, flexibilitate și reproductibilitate.

Domeniul este încă insuficient explorat, fiind necesare studii comparative, modele predictive între parametrii de imprimare și performanța triboelectrică, analize pe termen lung ale

stabilității sarcinii, precum și explorarea unor materiale polimerice sustenabile.

Intersecția dintre AM și triboelectricitate este o direcție emergentă, cu potențial ridicat atât pentru înțelegerea proceselor fundamentale, cât și pentru dezvoltarea de aplicații inovatoare în energie și dispozitive autoalimentate.

Partea a II-a. Contribuții la studiul comportamentului triboelectric al suprafeţelor polimerice obţinute prin imprimare 3D

Capitolul 4. Direcţiile, obiectivul principal şi metodologia de cercetare-dezvoltare

4.1. Direcţii de cercetare-dezvoltare

Pe baza celor desprinse din analiza stadiului actual, se apreciază a fi de actualitate următoarele direcții de cercetare-dezvoltare privind fabricația aditivă și influența acesteia asupra fenomenelor triboelectrostatice:

- optimizarea parametrilor procesului de imprimare 3D pentru obținerea unor suprafețe polimerice cu texturi controlate și reproductibile;
- investigarea relației dintre morfologia suprafeței (rugozitate, geometrie de texturare, orientare de construcție) și nivelul de triboîncărcare generat;
- analiza stabilității în timp a potențialului electrostatic acumulat pe suprafețele obținute prin AM, în funcție de tipul de texturare și de materialul utilizat;
- compararea performanțelor triboelectrice ale diferitelor tipuri de polimeri, cu accent pe materiale biodegradabile și sustenabile (ex. PLA);
- dezvoltarea unor modele conceptuale și experimentale care să permită corelarea între parametrii AM și performanțele triboelectrice, în vederea unor aplicații energetice (ex. nanogeneratoare triboelectrice – TENGs).

4.2. Obiectivul principal al activităţii de cercetare-dezvoltare

Având în vedere datele și concluziile desprinse din analiza stadiului actual, precum şi direcţiile de cercetare-dezvoltare menționate, se determină ca obiectiv principal al activităţii de doctorat:

Studiul comportamentului triboelectric al suprafețelor polimerice obținute prin fabricație aditivă și identificarea relației dintre parametrii de imprimare 3D, textura suprafeței și nivelul de triboîncărcare, în vederea optimizării acestora pentru aplicații energetice.

4.3. Metodologia de cercetare-dezvoltare

Metodologia de cercetare–dezvoltare este concepută ca un sistem de referință pentru

acțiunile care vor fi întreprinse în vederea realizării obiectivului principal al activității de doctorat, precum și pentru direcțiile de dezvoltare ulterioare.

Elementele de referință metodologice sunt după cum urmează:

1. Analiza literaturii de specialitate – pentru identificarea stadiului actual al cunoașterii privind tehnologiile AM, calitatea suprafețelor și influența acestora asupra fenomenelor triboelectrostatice.
2. Proiectarea și realizarea probelor experimentale – prin imprimare 3D de tip FDM, utilizând parametri de proces variați (orientare, grosime strat, model de umplere, tipuri de texturare).
3. Caracterizarea suprafețelor obținute – prin metode specifice (microscopie optică și electronică, determinarea rugozității, analiză dimensională), pentru a evalua morfologia și integritatea suprafețelor.
4. Determinarea potențialului electrostatic – utilizând echipamente de măsură dedicate (ex. voltmetru electrostatic, tribometru universal), în condiții controlate de contact și separare.
5. Analiza comparativă a rezultatelor – pentru a stabili corelații între parametrii de imprimare, textura suprafeței și performanțele triboelectrice obținute.
6. Formularea de concluzii și recomandări – privind optimizarea suprafețelor fabricate aditiv în vederea îmbunătățirii nivelului și stabilității încărcării triboelectrice, cu aplicabilitate în domeniul energetic și al dispozitivelor autoalimentate.

4.4. Materiale și metode

A. Proiectarea și fabricarea probelor

În ultimii ani, tehnologiile de fabricație aditivă au fost aplicate tot mai frecvent în domeniile academice și industriale pentru a îmbunătăți performanța materialelor și pentru a crește eficiența energetică, fiind considerate unele dintre soluțiile viitoare de generație nouă, cu avantaje precum reducerea costurilor, viteza de execuție, accesibilitatea, durabilitatea și capacitatea de a crea geometrii complexe [51]. Modelarea prin depunere de material topit (Fused Deposition Modelling - FDM) este una dintre cele mai utilizate tehnologii de imprimare 3D. Este cunoscută pentru diversitatea materialelor utilizate, ușurința în schimbarea materialului, costurile reduse de întreținere și capacitatea de a produce rapid piese subțiri, cu o toleranță de ±0,1 mm în general, fără necesitatea supravegherii, de dimensiuni compacte și funcționare la temperaturi scăzute.

Acidul polilactic (PLA) este un material de imprimare 3D ieftin și sustenabil, deoarece este de origine biologică și biodegradabil [52]. Alegerea utilizării PLA pentru experimente este justificată și de faptul că este cel mai folosit material termoplastic în imprimarea FDM. Deși are o plasticitate mai mică decât acrilonitril butadien stiren (ABS), are o rezistență mecanică mai mare.

Pentru imprimarea 3D a probelor a fost selectat un filament PLA roșu, cu diametru de 1,75 mm, marca RS PRO. Modelele 3D ale probelor au fost create în software-ul Solidworks și exportate în format STL (Standard Tessellation Language). Codurile geometrice au fost generate cu ajutorul software-ului de slicing IdeaMaker.

Au fost pregătite trei tipuri de probe folosind tehnica FDM. Toate probele au fost fabricate cu o imprimantă 3D durabilă, complet închisă, model RAISE3D E2 (Raise 3D Technologies Inc.). Caracteristica principală a imprimantei E2 este tehnologia cu extrudoare duble independente, cu moduri de tip oglindă și duplicare, ceea ce a fost foarte util pentru eficiența în timp a studiului.

Principalii parametri tehnologici aleși pentru imprimarea probelor sunt prezentați în Tabelul 2. Cele trei tipuri de probe, denumite în acest studiu „linii", „zigzag" și „valuri" (Figura 8), au fost fabricate cu dimensiuni de 50 mm × 50 mm × 5 mm și o adâncime a texturii de 1 mm. Versiunile CAD și printurile fizice prezintă variații semnificative, atribuite susceptibilității materialului PLA la contracție, cu o eroare dimensională de până la ±0,5 mm.

Tabelul 2. Principalii parametri tehnologici aleși pentru imprimarea probelor

	Parameter	Value
Process-based parameters	Melting temperature	200 °C
	Bed temperature	50 °C
	Printing speed	70 mm/s
Structural parameters	Layer thickness	0.1 mm
	Infill geometry	Gyroid
	Infill density	10%

B. Bancul de testare triboelectric

Experimentele au fost realizate folosind un tribometru liniar (Fig. 9) pentru a genera sarcina electrică prin frecarea a două probe (A și B – Fig. 10).

Un mod de a determina ce materiale funcționează cel mai bine împreună pentru a genera sarcini statice prin frecare este consultarea seriei triboelectrice. Când sunt frecate împreună, materialele aflate mai sus în listă capătă o sarcină pozitivă (pierdere de electroni), iar cele aflate mai jos capătă o sarcină negativă (câștig de electroni). Cu cât obiectele sunt mai îndepărtate în această listă, cu atât sarcina generată este mai puternică.

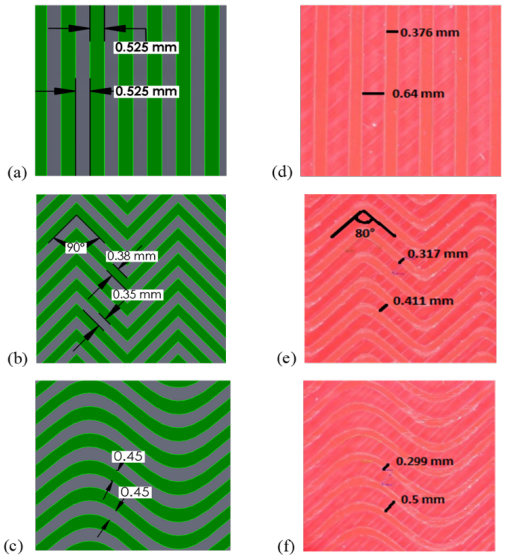


Fig. 8. Modele CAD ale mostrelor texturate din PLA: (a) „linii”, (b) „zigzag”, (c) „valuri” și imagine microscopică (Makrolite 4K, Vision Engineering Ltd) a mostrelor imprimate: (d) „linii”, (e) „zigzag”, (f) „valuri”.

După cum se vede în Fig. 9, proba B din PLA este atașată unui sistem de mișcare liniară (1) care se deplasează înainte și înapoi, antrenat de un motor electric liniar (4).

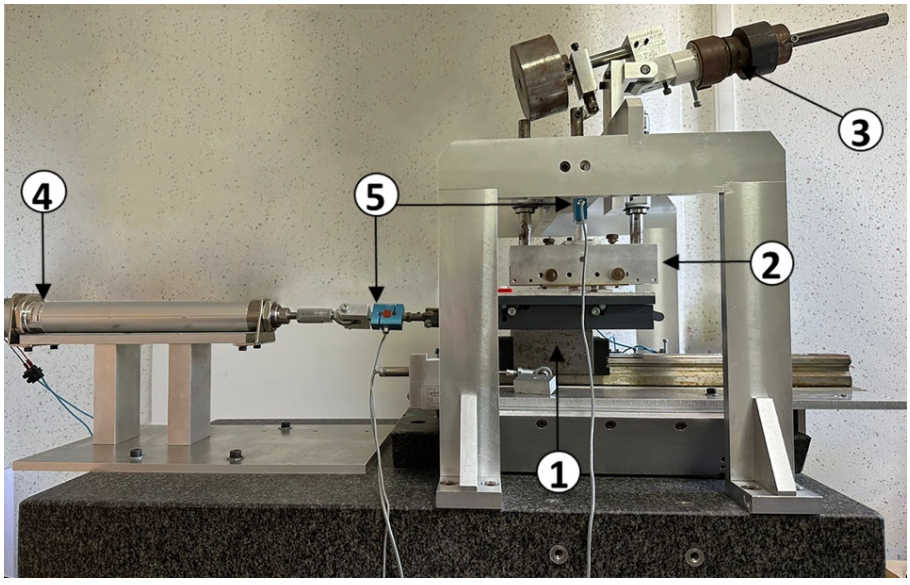


Fig. 9. Stand de testare de laborator pentru încărcarea triboelectrică a plăcilor polimerice: 1 – sistem de mișcare de alunecare care antrenează mostra B într-o mișcare de tip dus-întors; 2 – suport superior de care este atașată mostra A; 3 – dispozitiv tip pârghie pentru reglarea forței normale de contact; 4 – motor liniar; 5 – senzori de forță.

Proba A este conectată la un suport superior (2), fixat într-un sistem de ghidaj vertical, în timp ce forța normală este controlată manual printr-un mecanism de tip pârghie (3). Forțele tangențială și normală, precum și deplasările relative ale probelor sunt măsurate continuu cu ajutorul senzorilor (5).

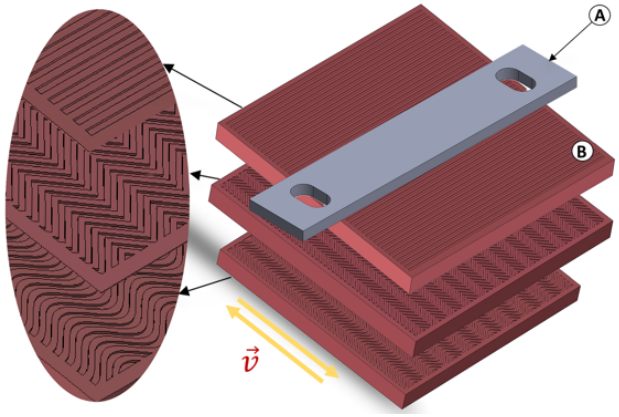


Fig. 10. Mișcarea relativă de frecare dintre mostrele A (Aluminiu) și B (PLA).

Configurarea bancului de testare permite controlul precis al factorilor care influențează procesul de triboincărcare, inclusiv viteza de alunecare relativă, lungimea cursei și numărul de cicluri de frecare. Acești parametri sunt programați și controlați prin software-ul LabVIEW, care asigură consistența pe parcursul experimentelor.

C. Sonda electrostatică

În cadrul experimentelor, distribuția sarcinii electrice de pe suprafețele probelor a fost evaluată cu ajutorul unei sonde de inducție (Trek, model 6300-7) conectată la un voltmetru electrostatic de înaltă sensibilitate (Trek, model 341B). Acest ansamblu experimental a fost montat pe un dispozitiv cu două axe, care a permis realizarea unei cartografieri precise a potențialului de suprafață pe întreaga arie a probelor (Fig. 11). Sistemul asigură o deplasare controlată a sondei deasupra probei, menținând o distanță constantă și garantând repetabilitatea măsurătorilor.

Pentru a obține o caracterizare cât mai detaliată, măsurătorile au fost realizate de-a lungul a 14 linii paralele, spațiate la 2 mm, acoperind suprafața de la colțul stânga-aproape până la colțul dreapta-îndepărtat al probei. Această strategie de eșantionare a permis identificarea variațiilor locale de potențial și a eventualelor neuniformități generate de procesul de frecare sau de particularitățile structurii suprafeței.

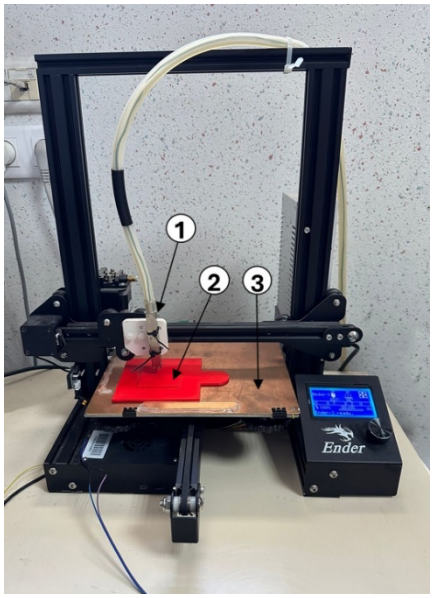


Fig. 11. Dispozitiv pe 2 axe pentru cartografierea potențialului de suprafață: 1 – sondă electrostatică; 2 – mostra B; 3 – placă împământată

D. Măsurători tribologice

În timpul experimentelor, specimenul superior (pinul) a fost coborât progresiv până la atingerea suprafeței probei, realizată din PLA, stabilindu-se astfel contactul inițial. Forța normală aplicată a fost de 20 N, valoare selectată pentru a reproduce cât mai fidel condițiile testelor anterioare efectuate pe tribometrul liniar și pentru a permite o comparație directă a rezultatelor. Odată stabilit contactul, pinul a alunecat pe suprafața plană a probei, generând un contact de frecare stabil și reproductibil.

Pe întreaga durată a măsurătorilor, forța normală aplicată s-a menținut practic constantă, datorită rigidității ridicate a senzorului de forță al tribometrului. Această stabilitate a permis obținerea unor date precise și reproductibile privind comportamentul tribologic al probelor. În timpul testelor, s-a aplicat o sarcină normală *F*, iar în paralel a fost înregistrată forța de frecare *Ff*, pe măsură ce bolțul de aluminiu aluneca pe suprafața probei din PLA, la o viteză de deplasare prestabilită. Această metodă a permis determinarea evoluției coeficientului de frecare în timp și analiza relației dintre condițiile mecanice de contact și fenomenele de încărcare triboelectrică observate la nivelul suprafeței polimerice. Rezultatele obținute constituie o bază solidă pentru corelarea comportamentului tribologic al materialelor polimerice cu proprietățile lor electrostatice.

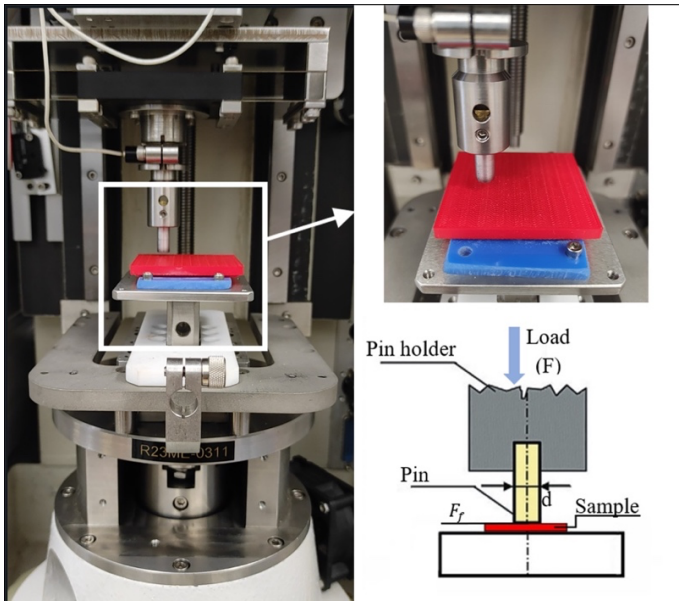


Fig. 12. Configurația tribometrului (UMT-2 (CETR)) și reprezentarea schematică.

Ulterior, pentru caracterizarea detaliată a suprafeței a fost utilizat instrumentul MarSurf GD 140 (Mahr GmbH, Germania) (Fig. 13). Acest echipament este un instrument de precizie de ultimă generație, conceput pentru evaluarea rugozității și ondulației suprafețelor cu un grad ridicat de acuratețe. În contextul fabricației aditive, unde calitatea strat-cu-strat influențează în mod direct atât proprietățile mecanice, cât și comportamentul triboelectric al pieselor, analiza detaliată a texturii suprafețelor devine esențială.

Stația de măsurare MarSurf GD 140 integrează un design mecanic robust cu un software sofisticat, care facilitează achiziția și interpretarea datelor. Senzorul de măsurare se deplasează cu precizie pe suprafața probei, înregistrând abaterile microscopice de la profilul ideal. Datele colectate sunt apoi procesate de software-ul dedicat, care permite vizualizarea grafică și calcularea parametrilor specifici de rugozitate și ondulație.

Capabilitățile instrumentului includ măsurarea parametrilor standardizați de topografie, conform normativului ISO 25178-2:2021, ceea ce asigură comparabilitatea rezultatelor obținute cu datele raportate în literatura internațională. Parametrii extrași oferă informații complete asupra caracteristicilor suprafeței, precum amplitudinea rugozității, distribuția neregularităților sau gradul de uniformitate. Aceste informații sunt indispensabile pentru evaluarea calității pieselor, optimizarea parametrilor de imprimare și corelarea topografiei cu fenomenele triboelectrice studiate.

Prin urmare, utilizarea echipamentului MarSurf GD 140 a oferit o imagine detaliată asupra topografiei suprafețelor obținute prin imprimare 3D, constituind o bază solidă pentru analiza relației dintre rugozitate și încărcarea electrostatică indusă în timpul testelor tribologice.

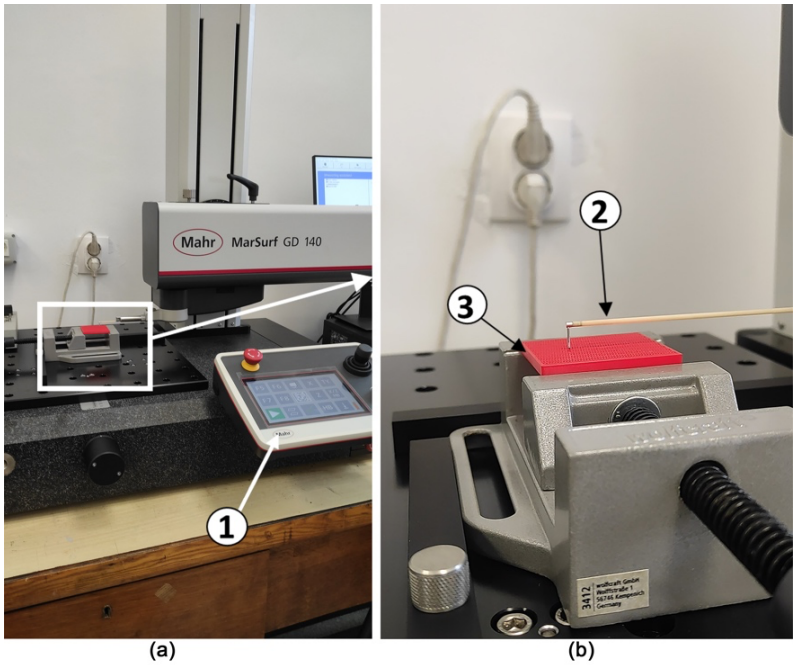


Fig. 13. Tribometru MarSurf GD 140 (Mahr GmbH): a) Vedere generală a configurației: 1 – panou de control, 2 – palpator de măsurare, 3 – mostră; b) Vedere de detaliu a brațului palpatorului de măsurare.

E. Procedura experimentală

Pe baza rezultatelor studiilor anterioare [35],[36], parametrii bancului de testare au fost aleși astfel:

- forța normală: 20 N,
- viteza de translație: 20 mm/s,
- cursa suportului probei inferioare: 50 mm,
- numărul de cicluri de frecare: 20, respectiv 40.

Pentru a evita influențarea rezultatelor de către eventuale deteriorări ale suprafeței cauzate de proba din aluminiu, de transferul de material sau de sarcinile reziduale, s-a folosit o probă nouă pentru fiecare experiment, asigurând astfel reproductibilitatea.

Prima serie de experimente a constat în încărcarea suprafeței probelor de PLA folosind standul de triboincărcare, timp de 20 și 40 de cicluri, cu o bară de aluminiu. Probele încărcate triboelectric au

fost apoi scanate cu voltmetrul electrostatic, antrenat de sistemul de mapare 2D, pentru a cartografia distribuția, variațiile și tiparele potențialului electric — care reflectă distribuția sarcinii electrice.

A doua serie de experimente a constat în încărcarea probelor PLA cu standul de triboincărcare pentru 20, respectiv 40 de cicluri, după care acestea au fost plasate sub sonda voltmetrului electrostatic timp de câte 10 minute, pentru a măsura evoluția potențialului de suprafață — reflectând curba de decădere a potențialului de suprafață (SPD) — în timp, într-o zonă fixă: mai precis, în centrul probei. Această abordare a permis monitorizarea modului în care sarcina de suprafață se disipează într-o singură locație constantă pe parcursul experimentelor. Punctul final de 10 minute pentru a doua serie de experimente a fost ales deoarece, până la acel moment, potențialul electric decăzuse la mai puțin de un sfert din valoarea sa inițială, iar măsurătorile ulterioare nu ar fi oferit informații semnificative suplimentare despre procesul de decădere.

4.5. Rezultate și discuții

Tabelul 3 prezintă valorile dispersiei potențialului electric pentru cele trei tipuri de texturi analizate. Dintre acestea, cea mai mică dispersie, de aproximativ 15%, a fost înregistrată pentru suprafața probei din PLA cu textură de tip „linii”. Această valoare redusă sugerează un comportament mai uniform și o stabilitate superioară a sarcinii electrice acumulate, ceea ce poate fi atribuit geometriilor simple și repetabile ale acestei texturi.

În comparație, texturile mai complexe, precum „zigzag” și „valuri”, au generat dispersii mai mari, reflectând o distribuție mai neuniformă a sarcinii electrice pe suprafață. Aceste diferențe indică faptul că topografia are un rol decisiv în modul de acumulare și disipare a sarcinii triboelectrice. Astfel, textura „linii” se dovedește a fi cea mai predictibilă și mai stabilă dintre variantele analizate, ceea ce o face mai potrivită pentru aplicații care necesită constanță în comportamentul electrostatic.

Tabel 3. Comparație a dispersiei valorilor potențialului înregistrate pentru cele trei tipuri de mostre

Texture	Cycles	Min (V)	Max (V)	Average (V)	Range (V)	Disp/Aver
Lines	20 Cyc	163	191	179	28	15%
	40 Cyc	328	412	364	84	28%
Zigzag	20 Cyc	183	277	227	94	41%
	40 Cyc	451	830	524	379	72%
Waves	20 Cyc	709	1010	859	301	35%
	40 Cyc	555	1595	1123	1040	92%

D. Coeficientul de frecare și forța de frecare

Testele de frecare uscată cu mișcare alternativă au fost efectuate pe tribometrul UMT-2 (CETR), în condiții de temperatură ambientală și umiditate relativă de 50–60%. Parametrii de testare au fost: 1 cursă, durată de 30 de secunde, distanță de alunecare de 30 mm și forță normală de 20 N. Figurile 23 și 24 arată cum variază forța de frecare și coeficientul de frecare pentru toate suprafețele analizate, în funcție de timpul parcurs. Valorile au fost înregistrate cu o frecvență de 100 Hz.

Coeficientul de frecare (CoF) este calculat ca raport dintre forța de frecare (Ff) și forța normală corespunzătoare. În contextul comportamentului de frecare în două etape, observat la toate cele trei tipuri de probe, creșterea rapidă inițială a CoF în prima etapă (primele 5 secunde) poate fi explicată prin tranziția de la frecarea statică la frecarea cinetică . Inițial, forța de frecare este generată în principal de frecarea statică, care se opune inițierii mișcării. Odată începută mișcarea, forța de frecare devine cinetică, ceea ce duce la vârful observat în CoF.

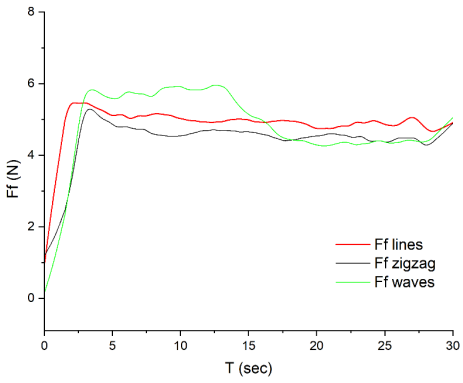


Fig. 23. Variația forței de frecare în funcție de timp

.

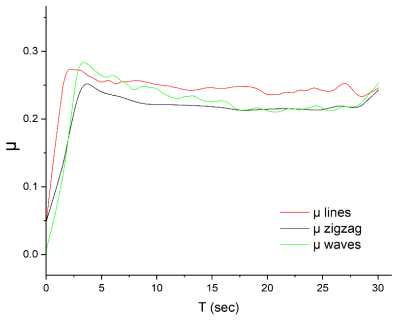


Fig. 24. Variația coeficientului de frecare în funcție de timp

În a doua etapă, pe măsură ce alunecarea continuă, forța de frecare se stabilizează, iar CoF devine constant. Acest lucru se întâmplă deoarece forța de frecare cinetică se menține constantă după faza inițială de ajustare, odată ce suprafețele celor două corpuri sunt deja în mișcare relativă. Fluctuațiile CoF din această etapă pot fi atribuite variațiilor profilului suprafeței pe care alunecă pinul. În această fază, forța de frecare este influențată în principal de natura suprafețelor de contact și de forța normală.

Durata mai scurtă a primei etape în cazul texturii „linii” sugerează că această suprafață are o forță de frecare statică mai mică, permițând tranziția mai rapidă către frecarea cinetică. După această tranziție, coeficientul de frecare se stabilizează, reflectând predominanța frecării cinetice. Figura 25 ilustrează coeficientul de frecare maxim și mediu, precum și forța de frecare, pentru toate probele. În ciuda diferențelor de magnitudine, variația coeficientului de frecare este foarte similară în toate cazurile. Valorile relativ ridicate ale frecării în toate cele trei cazuri susțin prezența sarcinii electrice la suprafața probelor. În plus, suprafața cu cel mai mare CoF a fost cea cu textura „valuri”, care a prezentat și cea mai mare sarcină, ceea ce confirmă legătura dintre rugozitate și nivelul de încărcare.

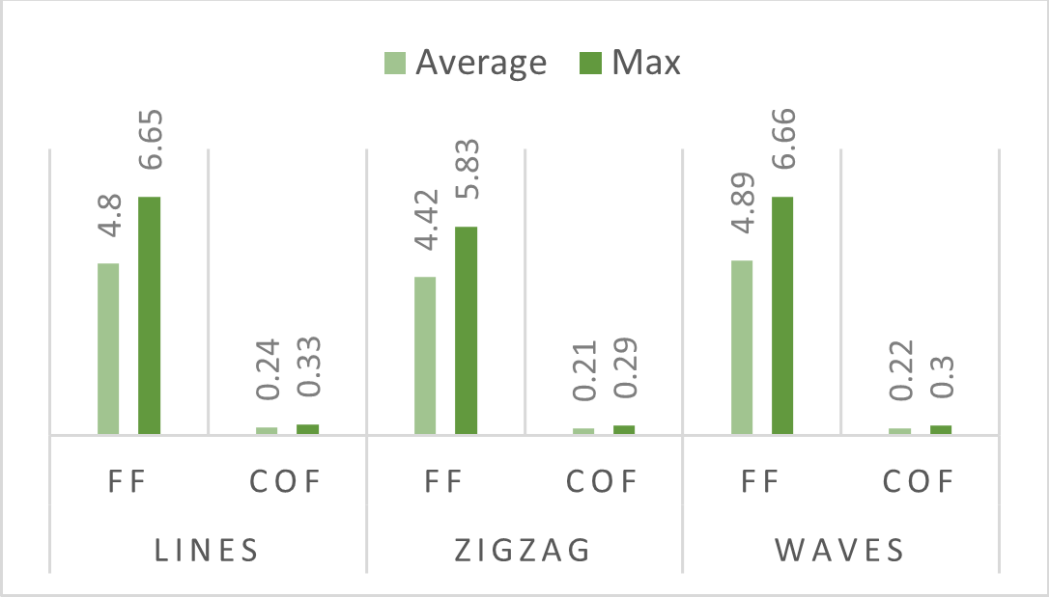


Fig. 25. Grafic comparativ al valorilor maxime și medii ale coeficientului de frecare și ale forței de frecare pentru cele trei tipuri de mostre

E. Parametrii de rugozitate

Scopul măsurătorilor a fost compararea parametrilor de rugozitate Ra/Sa și Rz/Sz pentru cele trei tipuri de probe, ca indicatori ai calității suprafeței. Rezultatele au arătat că textura „valuri" prezintă cele mai mari valori pentru toți parametrii analizați, confirmând ipoteza conform căreia rugozitatea ridicată favorizează acumularea de sarcină prin extinderea zonelor de contact și intensificarea câmpului electric local. Prin urmare, relația dintre rugozitate și potențial triboelectric este directă, suprafețele mai aspre acumulând niveluri mai mari de sarcină. Această concluzie are un rol esențial în optimizarea texturii suprafețelor polimerice imprimate 3D pentru aplicații specifice.

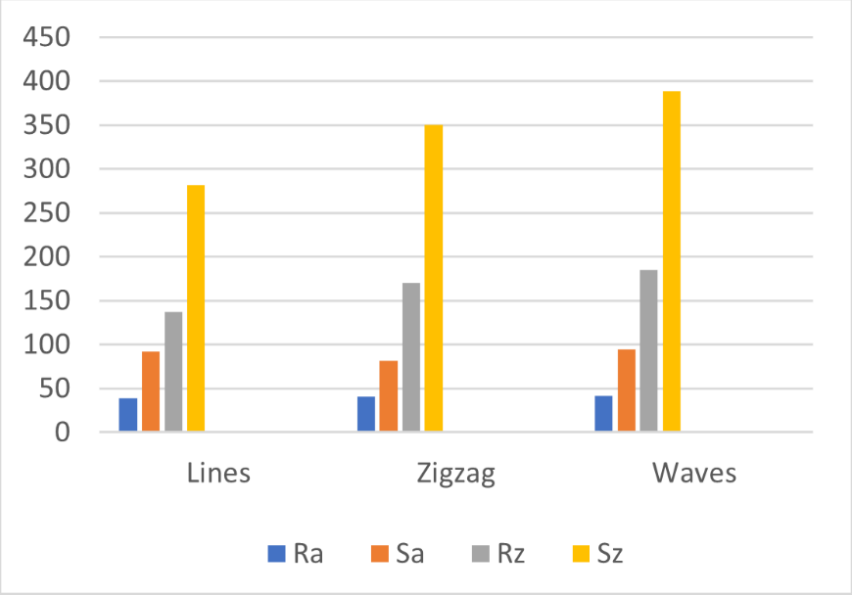


Fig. 29. Valorile medii Ra/Sa (µm) și Rz/Sz (µm) pentru cele trei tipuri diferite de texturi

4. Concluzii

Obiectivul lucrării a fost investigarea influenței a trei tipuri de texturi imprimate 3D din PLA asupra încărcării triboelectrice apărute la contactul cu aluminiu. Măsurătorile au arătat că texturile „linii" și „zigzag" generează niveluri și dispersii similare ale potențialului, în timp ce textura „valuri" produce valori de peste două ori mai mari, menținute și după 20, respectiv 40 de cicluri de frecare. Curbele de decădere confirmă acest comportament distinct, potențialul inițial al texturii „valuri" fiind net superior celorlalte. Totodată, testele tribologice au evidențiat pentru aceeași textură valori mai ridicate ale coeficientului de frecare și uzurii. Rezultatele pot fi corelate cu rugozitatea suprafețelor și indică necesitatea unor studii suplimentare pe materiale și morfologii variate, pentru a fundamenta aplicarea polimerilor imprimați 3D în energy harvesting,

dispozitive medicale și electronice de mici dimensiuni.

Capitolul 5. Concluzii finale şi contribuţii principale

5.1. Concluzii finale

Din analiza stadiului actual reiese că tehnologiile de fabricație aditivă oferă avantaje importante (geometrii complexe, reducerea materialului, flexibilitate), dar și limitări (costuri, materiale reduse, calitatea suprafețelor). În domeniul triboelectricității, morfologia suprafeței este esențială pentru generarea și stabilitatea sarcinii, însă corelarea cu parametrii de imprimare 3D este încă puțin studiată. Astfel, teza și-a propus ca obiectiv principal investigarea comportamentului triboelectric al suprafețelor polimerice imprimate 3D și stabilirea relațiilor dintre parametrii de proces, textura suprafeței și nivelul de încărcare, în vederea optimizării pentru aplicații energetice. Rezultatele au arătat că tipul de texturare, rugozitatea, orientarea de imprimare și grosimea stratului influențează direct nivelul și stabilitatea sarcinii; texturile liniare oferă distribuții uniforme, cele sinusoidale valori maxime dar variabile, iar rugozitatea crescută generează sarcini inițiale mari cu disipare rapidă. Metodologia de testare dezvoltată s-a dovedit reproductibilă și aplicabilă în cercetări viitoare de optimizare.

5.2. Contribuții principale

Teza aduce contribuții originale prin elaborarea unei metodologii experimentale integrate pentru caracterizarea comportamentului triboelectric al probelor polimerice imprimate 3D, cu proceduri clare de pregătire și măsurare reproductibilă. Au fost realizate și testate suprafețe texturate cu geometrii variate (linii, rețele, forme sinusoidale), explorate pentru prima dată sistematic în literatura de specialitate. De asemenea, s-au identificat corelații directe între parametrii de imprimare (orientare, grosime strat) și nivelul sau stabilitatea sarcinii electrice acumulate. O altă contribuție constă în fundamentarea utilizării materialelor biodegradabile (PLA) în aplicații triboelectrice, subliniind atât sustenabilitatea lor, cât și potențialul funcțional. În plus, au fost propuse direcții aplicative de integrare a suprafețelor imprimate 3D în nanogeneratoare triboelectrice și sisteme energetice complementare, demonstrând transferul cercetării către aplicații practice în energia regenerabilă și tehnologiile inteligente.

5.3. Importanța tezei

Prezenta teză aduce o contribuție relevantă la dezvoltarea domeniului interdisciplinar dintre fabricația aditivă și fenomenele triboelectrice, explorând o zonă insuficient studiată, dar cu mare potențial științific și tehnologic în contextul energiei verzi și al noilor materiale. Contribuțiile originale constau în demonstrarea legăturii dintre textura suprafețelor obținute prin imprimare 3D și nivelul de încărcare triboelectrică, oferind o bază solidă pentru înțelegerea mecanismelor fundamentale și pentru dezvoltarea de modele predictive. Importanța practică este reflectată prin validarea unui cadru metodologic aplicabil atât în cercetarea fundamentală, cât și în industrie, cu rezultate utile în optimizarea proceselor AM și în proiectarea suprafețelor pentru nanogeneratoare

triboelectrice. Totodată, metodologia propusă reprezintă un sprijin pentru formarea academică și pentru specialiștii interesați de aplicații emergente ale Industriei 4.0 și ale tehnologiilor sustenabile.

5.4. Perspective viitoare

Problematica tezei necesită cercetare continuă, orientată spre extinderea studiilor la o gamă mai largă de materiale polimerice și compozite, cu accent pe variante biodegradabile și sustenabile, relevante în contextul tranziției ecologice. Sunt esențiale metode avansate de caracterizare (AFM, FEM, măsurători locale de sarcină) pentru o înțelegere detaliată a mecanismelor triboelectrice la scară micro și nano, precum și dezvoltarea de modele numerice predictive care să coreleze parametrii de imprimare 3D cu performanțele obținute. Totodată, integrarea suprafețelor optimizate în prototipuri funcționale de nanogeneratoare triboelectrice ar valida aplicabilitatea rezultatelor, deschizând perspective pentru implementări practice în senzori autonomi, dispozitive portabile sau sisteme de recuperare a energiei.

Bibliografie

[1] A.F. Diaz, R.M. Felix-Navarro, A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: the influence of chemical structure and properties, J. Electrost. 62 (2004) 277–290. https://doi.org/10.1016/j.elstat.2004.05.005.

[2] G.W. Follows, J. Lowell, M.P.W. Wilson, Contact electrification of polyamides, J. Electrost. 26 (1991) 261–273. https://doi.org/10.1016/0304-3886(91)90021-7.

[3] J. Lowell, A.C. and Rose-Innes, Contact electrification, Adv. Phys. 29 (1980) 947–1023. https://doi.org/10.1080/00018738000101466.

[4] U.G. Musa, S.D. Cezan, B. Baytekin, H.T. Baytekin, The Charging Events in Contact-Separation Electrification, Sci. Rep. 8 (2018) 2472. https://doi.org/10.1038/s41598-018-20413-1.

[5] D.J. Lacks, R. Mohan Sankaran, Contact electrification of insulating materials, J. Phys. Appl. Phys. 44 (2011) 453001. https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/45/453001.

[6] L.S. McCarty, G.M. Whitesides, Electrostatic Charging Due to Separation of Ions at Interfaces: Contact Electrification of Ionic Electrets, Angew. Chem. Int. Ed. 47 (2008) 2188–2207. https://doi.org/10.1002/anie.200701812.

[7] J.N. Rasera, R.D. Cruise, J.J. Cilliers, J.-A. Lamamy, K. Hadler, Modelling the tribocharging process in 2D and 3D, Powder Technol. 407 (2022) 117607. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117607.

[8] S. Trigwell, N. Grable, C.U. Yurteri, R. Sharma, M.K. Mazumder, Effects of surface properties on the tribocharging characteristics of polymer powder as applied to industrial processes, IEEE Trans. Ind. Appl. 39 (2003) 79–86. https://doi.org/10.1109/TIA.2002.807228.

[9] K. Saleh, A. Traore Ndama, P. Guigon, Relevant parameters involved in tribocharging of powders during dilute phase pneumatic transport, Chem. Eng. Res. Des. 89 (2011) 2582–2597. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.06.001.

[10] O. Tilmatine, T. Zeghloul, K. Medles, L. Dascalescu, A. Fatu, Effect of ambient air relative humidity on the triboelectric properties of Polypropylene and Polyvinyl Chloride slabs, J. Electrost. 115 (2022) 103651. https://doi.org/10.1016/j.elstat.2021.103651.

[11] T.A.L. Burgo, C.A. Silva, L.B.S. Balestrin, F. Galembeck, Friction coefficient dependence on electrostatic tribocharging, Sci. Rep. 3 (2013) 2384. https://doi.org/10.1038/srep02384.

[12] E. Nikitina, H. Barthel, M. Heinemann, Electron Transfer in Electrical Tribocharging Using a Quantum Chemical Approach, J. Imaging Sci. Technol. 53 (2009) 040503. https://doi.org/10.2352/J.ImagingSci.Technol.2009.53.4.040503.

[13] D. Tan, M. Willatzen, Z.L. Wang, Electron transfer in the contact-electrification between corrugated 2D materials: A first-principles study, Nano Energy 79 (2021) 105386. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105386.

[14] C. Xu, Y. Zi, A. Wang, H. Zou, Y.-J. Dai, X. He, P. Wang, Y.-C. Wang, P. Feng, D. Li, Z. Wang,

On the Electron-Transfer Mechanism in the Contact-Electrification Effect, Adv. Mater. 30 (2018) 1706790. https://doi.org/10.1002/adma.201706790.

[15] M. Beckschulte, E. Taglauer, The influence of work function changes on the charge exchange in low-energy ion scattering, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At. 78 (1993) 29–37. https://doi.org/10.1016/0168-583X(93)95772-W.

[16] A.F. Diaz, D. Fenzel-Alexander, An ion transfer model for contact charging, Langmuir 9 (1993) 1009–1015. https://doi.org/10.1021/la00028a021.

[17] R. Pandey, H. Kakehashi, H. Nakanishi, S. Soh, Correlating Material Transfer and Charge Transfer in Contact Electrification, J. Phys. Chem. C 122 (2018). https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b04357.

[18] R. Holm, Theory of the electric material transfer in switching contacts. History of this theory, in: R. Holm (Ed.), Elektr. Kontakte Electr. Contacts Handb., Springer, Berlin, Heidelberg, 1958: pp. 376–387. https://doi.org/10.1007/978-3-662-25893-4_66.

[19] D.S. Rimai, D.S. Weiss, M. Cristina de Jesus, D.J. Quesnel, Electrophotography as a means of microfabrication: the role of electrodynamic and electrostatic forces, Comptes Rendus Chim. 9 (2006) 3–12. https://doi.org/10.1016/j.crci.2004.10.030.

[20] C.B. Duke, J. Noolandi, T. Thieret, The surface science of xerography, Surf. Sci. 500 (2002) 1005–1023. https://doi.org/10.1016/S0039-6028(01)01527-8.

[21] H. Moulai, T. Zeghloul, N. Menad, L. Dascalescu, Effect of high voltage and electrode configuration on the trajectories of metallic particles in roll-type electrostatic separators for granular mixtures, J. Electrost. 133 (2025) 104014. https://doi.org/10.1016/j.elstat.2024.104014.

[22] T. Zeghloul, A. Mekhalef Benhafssa, G. Richard, K. Medles, L. Dascalescu, Effect of particle size on the tribo-aero-electrostatic separation of plastics, J. Electrost. 88 (2017) 24–28. https://doi.org/10.1016/j.elstat.2016.12.003.

[23] G. Bedeković, R. Trbović, Electrostatic separation of aluminium from residue of electric cables recycling process, Waste Manag. 108 (2020) 21–27. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.033.

[24] A. Reguig, A. Bendaoud, P. Dordizadeh, A.R. Salama, S. Messal, L. Dascalescu, Experimental study of a modified dual-type high-voltage electrode for electrostatic separation applications, J. Electrost. 88 (2017) 232–235. https://doi.org/10.1016/j.elstat.2016.12.007.

[25] L. Dascalescu, T. Zeghloul, K. Medles, A. Iuga, Recent advances in the electrostatic separation of particulate matter, J. Electrost. 134 (2025) 104036. https://doi.org/10.1016/j.elstat.2025.104036.

[26] Y. Tian, J. Yin, T. Ma, W. Yan, H. Zhu, H. Sun, Study on electrostatic separation technology and characterization of shrimp shell protein, Sep. Purif. Technol. 354 (2025) 128862. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128862.

[27] K. Daioui, T. Zeghloul, N. Perbet, L. Dascalescu, Tribo-electrostatic separation of plastic flakes originating from packaging waste, J. Electrost. 134 (2025) 104046. https://doi.org/10.1016/j.elstat.2025.104046.

[28] Q. Wang, T. Wang, Y. Liu, S. Xie, S. Du, Y. Li, J. Yu, L. Zhang, D. Li, D. Li, Y. Guo, X. Wang,

3D visualization microscope of TENG contact interface based on astigmatic imaging, Nano Energy 129 (2024) 110061. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.110061.

[29] A novel polymer composite from polyhexamethylene guanidine hydrochloride for high performance triboelectric nanogenerators (TENGs), RSC Adv. 15 (2025) 844–850. https://doi.org/10.1039/d4ra07768g.

[30] J. Ye, C. He, X. Gong, H. Zhang, X. Li, Blue energy harvesting based on triboelectric nanogenerators (TENG): Structural design, performance optimization, and application prospects, J. Alloys Compd. 1014 (2025) 178710. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.178710.

[31] F. Xing, G. Tang, H. Wang, M. Wang, M. Wu, M. Xu, Exploring the synergy of EMG and TENG in motion based hybrid energy harvesting, Nano Energy 134 (2025) 110584. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.110584.

[32] W. Wang, N. Yin, Z. Wu, Z. Zhang, Omnidirectional energy harvesting with 3D-TENG for vibration diagnosis, Chem. Eng. J. 509 (2025) 161022. https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.161022.

[33] J. Wang, P. Li, X. Kang, Z. Li, S. Dai, Soft-soft contact TENG using nonlinear coupling galloping phenomenon for harvesting wind energy, Nano Energy 133 (2025) 110471. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.110471.

[34] S. Qiu, X. Teng, Y. Zhang, X. Wang, K. Chen, J. Zhao, Q. Huang, Wearing comfortable and high electrical output TENGs woven with PTFE core–shell nanofiber yarns, Chem. Eng. J. 505 (2025) 159501. https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159501.

[35] Electrostatic properties of powder coatings, Focus Powder Coat. 2010 (2010) 3–5. https://doi.org/10.1016/S1364-5439(10)70051-4.

[36] Y. Tabata, S. Masuda, Minimum Potential of Charged Insulator to Cause Incendiary Discharges, IEEE Trans. Ind. Appl. IA-20 (1984) 1206–1211. https://doi.org/10.1109/TIA.1984.4504584.

[37] M. Glor, Electrostatic ignition hazards in the process industry, J. Electrost. 63 (2005) 447–453. https://doi.org/10.1016/j.elstat.2005.03.001.

[38] W.D. Greason, Electrostatic discharge in electronics, Research Studies Press and J. Wiley, 1992. https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282272766702336 (accessed March 28, 2025).

[39] J. Pionteck, G. Wypych, eds., 4 - ELECTROSTATIC HAZARDS, in: Handb. Antistatics Second Ed., ChemTec Publishing, 2016: pp. 65–73. https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-95-9.50006-6.

[40] S. Cho, M.R. Khawar, Y. Ra, S. Jang, D. Lee, D. Kam, S.A. Shah, D. Yoo, Y. Javed, A. Ahmad, Y. Lee, H.J. Hwang, C. Lee, D. Choi, Advances in 3D-printed triboelectric nanogenerators and supercapacitors for self-sustainable energy systems, Mater. Today (2025). https://doi.org/10.1016/j.mattod.2025.02.010.

[41] S. Akin, T. Chang, S.S.H. Abir, Y.W. Kim, S. Xu, J. Lim, Y. Sim, J. Lee, J.-T. Tsai, C. Nath, H. Lee, W. Wu, J. Samuel, C.H. Lee, M.B.-G. Jun, One-step fabrication of functionalized electrodes on 3D-printed polymers for triboelectric nanogenerators, Nano Energy 129 (2024) 110082. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.110082.

[42] Influence of 3D printed surface texturing on the tribo-charging process of polymer slabs in

conformal contact | Request PDF, in: ResearchGate, n.d. https://doi.org/10.1109/IAS54024.2023.10406393.

[43] N. Li, L. Ma, X. Xu, J. Luo, Influence of "Seebeck effect" on charge transfer between two friction surfaces, Tribol. Int. 161 (2021) 107060. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107060.

[44] Q. Li, W. Liu, H. Yang, W. He, L. Long, M. Wu, X. Zhang, Y. Xi, C. Hu, Z.L. Wang, Ultra-stability high-voltage triboelectric nanogenerator designed by ternary dielectric triboelectrification with partial soft-contact and non-contact mode, Nano Energy 90 (2021) 106585. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106585.

[45] W. Li, L. Ma, X. Xu, J. Luo, Bidirectional electron transfer in Triboelectrification caused by friction-induced change in surface electronic structure, Nano Energy 114 (2023) 108667. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108667.

[46] B. Neagoe, H.-N. Teodorescu, Y. Prawatya, L. Dascalescu, T. Zeghloul, Experimental bench for studying the relation between the dynamic characteristics of the frictional motion and the electric potential at the surface of polymer slabs in sliding conformal contact, Tribol. Int. 111 (2017) 107–115. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.03.006.

[47] G.S.P. Castle, Contact charging between insulators, J. Electrost. 40–41 (1997) 13–20. https://doi.org/10.1016/S0304-3886(97)00009-0.

[48] M. Loos, Chapter 2 - Composites, in: M. Loos (Ed.), Carbon Nanotube Reinf. Compos., William Andrew Publishing, Oxford, 2015: pp. 37–72. https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3195-4.00002-3.

[49] K. Babooram, Chapter 1 - Brief overview of polymer science, in: R. Narain (Ed.), Polym. Sci. Nanotechnol., Elsevier, 2020: pp. 3–12. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816806-6.00001-7.

[50] N.K. Myshkin, M.I. Petrokovets, A.V. Kovalev, Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer, Tribol. Int. 38 (2005) 910–921. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.07.016.

[51] C. Sun, Y. Wang, M.D. McMurtrey, N.D. Jerred, F. Liou, J. Li, Additive manufacturing for energy: A review, Appl. Energy 282 (2021) 116041. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116041.

[52] R. Aziz, M.I. Ul Haq, A. Raina, Effect of surface texturing on friction behaviour of 3D printed polylactic acid (PLA), Polym. Test. 85 (2020) 106434. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106434.