

Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași
Facultatea de Mecanică

Bionică

Note de curs

Studii universitare de masterat

Domeniul: Mecatronică și Robotică

Specializarea: Mecatronică Avansată

Ș.L.dr.bioing. CÂRLESCU VLAD

Prefață

În lucrarea de față se prezintă o colecție de "povești de succes" din sfera Bionicii care există deja în multe arii tehnologice ce oferă soluții noi și durabile. Sunt prezentate detalii despre numeroase invenții ale omului inspirate din modele naturale ce au contribuit la evoluția și dezvoltarea tehnologică a societății.

Cartea se adresează nu numai studenților de la ciclul universitar de învățământ superior de masterat, la care autorul susține orele de curs și lucrări practice, specializarea Mecatronică Avansată, ci și inginerilor care împărtășesc cercetări în domenii ce se află la granița dintre biologie și inginerie.

De asemenea, lucrarea poate deschide idei noi și concepte moderne pentru a dezvolta produse și servicii prietenoase cu natura și poate fi folosită de studenți pentru a se iniția în domeniul Bionicii sau Biomimeticii dar și pentru realizarea proiectelor sau lucrărilor de disertație.

1. Introducere în BIONICĂ

Deși ritmul rapid de industrializare din ultimele decenii a ajutat la prelungirea și îmbunătățirea calității vieții și la combaterea anumitor boli, aceasta a atras după sine un grad mare de poluare și distrugere a mediului înconjurător care poate afecta supraviețuirea omenirii. În această derivă spre industrializare, omul a făcut eforturi pentru a crea produse ce îi pot îmbunătăți viața. Totuși, supraviețuirea omenirii se confruntă cu o mare dilemă a trăirii din resurse limitate. Soluțiile privind epuizarea acestor resurse naturale și problema supraviețuirii nu ne-au fost întotdeauna foarte clare, deși răspunsul este chiar lângă noi, în natură (Benyus, 2002).

Natura este cel mai complex sistem și a reprezentat drept model de inspirație pentru om încă din cele mai vechi timpuri. De-a lungul evoluției, natura a acționat în mod constant ca un "inginer" în rezolvarea problemelor găsind soluții eficiente ce au fost perfecționate în timp, ajungând la un grad ridicat de optimizare din punct de vedere structural și funcțional. Fie că sunt mai simple sau mai complexe, mai robuste sau mai fragile, viețuitoarele s-au adaptat la diferite medii și factori externi, dobândind abilități din cele mai diverse. Aceste abilități au la bază soluții ingenioase iar înțelegerea acestora ne poate oferi informații despre cum a funcționat și s-a dezvoltat natura în procesul de evoluție. Mai mult, putem descoperi materiale noi, structuri și funcții ce pot fi de ajutor în dezvoltarea de produse inovative în domenii precum arhitectură, construcții, medicină, aviație, telecomunicații, ingineria suprafetelor, textile, automobile, robotică ș.a. (Scherge și Gorb, 2001; Benyus, 2009; Shimomura, 2010). O astfel de relație simbiotică joacă un rol important în coexistența omului cu natura iar amploarea aplicațiilor poate fi nemărginită (Benyus, 2002; Bhushan, 2009; Hwang et al., 2015).

Recunoscându-ne limitele și acceptând lecțiile oferite de procesul evolutiv ce a avut loc de-a lungul a miliarde de ani putem spera la un viitor sustenabil, în care progresul tehnologic și respectul față de natură să se îmbine armonios.

1.1 Termeni utilizați

Biomimetica (în engleză, *Biomimetics*) prin contopirea cuvintelor *biology* și *mimesis* (a imita), a fost propus de Otto Herbert Schmitt în 1957, care lucra la acea vreme la doctorat pentru dezvoltarea unui circuit comparator de întârziere care

convertește un semnal analogic într-un semnal digital, circuit care îi poartă și numele, inspirându-se din modalitatea de propagare a semnalelor nervoase la calamari. Astfel, Schmitt a preconizat încă de atunci o schimbare a viziunii asupra disciplinei de biofizică, la ceva ce avea să devină biomimetica.

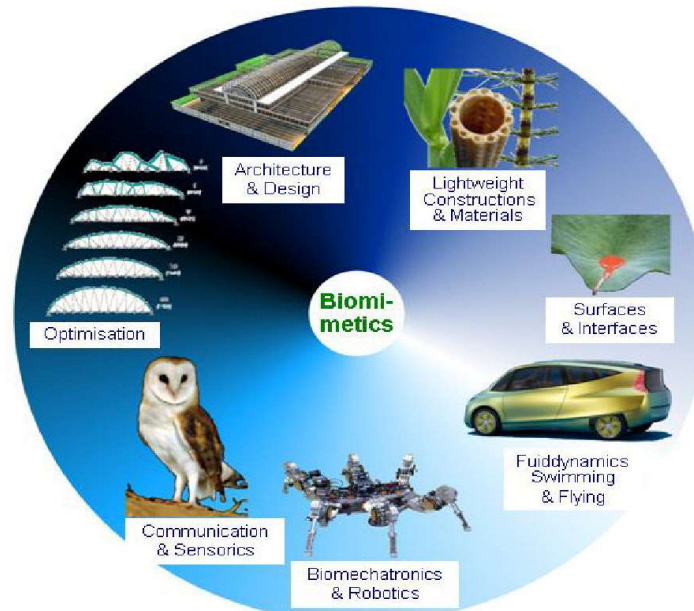


Figura 1. Domeniile de aplicabilitate ale Bionicii (BIOKON)

Bionica (în engleză, *Bionics*) prin contopirea cuvintelor *biology* și *technics* (tehnică), a fost propus de Jack E. Steele în 1960 din cadrul NASA cu prilejul primului Simpozion de Bionică din SUA care a avut loc la baza militară Wright - Patterson Air Force din Dayton, Ohio.

Biomimetism (în engleză, Biomimicry) a fost propus de Janine Benyus în cartea sa din 2002 intitulată *Biomimicry: Innovation inspired by nature*, în care termenul este definit ca "o nouă știință ce studiază modele și procese din natură care mai apoi imită sau se inspiră din acestea pentru a rezolva problemele omenirii". De asemenea, Benyus sugerează să privim natura ca un model, o mărime sau ca pe un mentor și subliniază că sustenabilitatea este obiectivul biomimetismului.

1.2 Definiții

- Disciplină aplicativă a biologiei care se inspiră din cunoștințele asupra structurilor, funcțiilor și proceselor organismelor vii în vederea transpunerii acestora în practică ca soluții tehnice sau tehnologice (Mihail, 1984).

- O formă creativă a tehnologiei care copie sau imită natura pentru a găsi soluții sustenabile la problemele omenirii pentru a-și îmbunătăți viața.

- Știință cu caracter interdisciplinar care se ocupă cu studiul proceselor biologice și structurii organismelor vii în vederea copierii, imitării și îmbunătățirii cu scopul de a rezolva prin similitudine probleme tehnice (Starețu, 2016).

- Studiul și transferul invențiilor naturii spre aplicații tehnice (BIOKON, Bionics Competence Network).

- Studiul sistemelor și metodelor biologice din natură în vederea proiectării și dezvoltării de sisteme ingineresti pentru tehnologia modernă (McCarty, 2009).

Gudoșnik consideră că bionica tinde să descopere în biosisteme anumite legități care ar putea fi caracterizate ca mecanice sau tehnice. În concepția sa, bionica are de cercetat numai latura tehnică a biosistemelor, adică ceea ce poate fi imitat în dispozitivele artificiale sau folosit în mod direct, aplicarea în tehnică a acestor idei nemaifiind sub incidența bionicii, aceasta constituind sarcina inginerilor și constructorilor (Gheorghe, 1990).

După Kraiser bionica este știința sistemelor artificiale care prezintă caracteristici ale organismelor vii (Gheorghe, 1990).

După Heynert, bionica are drept conținut studiul sistematic al ființelor vii în vederea rezolvării mai ales a problemelor tehnicii și tehnologiei, structurile și procesele din sistemele vii servind ca exemple, modele și proiecte pentru construcții și procedee, mai ales în industrie (Gheorghe, 1990).

V. Gheorghe și A. Popescu (1990) au sintetizat următoarea definiție a bionicii: "Bionica este știința multidisciplinară care se ocupă cu studiul biosistemelor cu scopul de a descoperi legitățile lor structurale și funcționale și a le transfera tehnicii, în vederea realizării unor dispozitive sau sisteme artificiale cu performanțe și parametri optimi de funcționare".

1.3 Concept

Metodica cercetării în Bionică constă mai întâi în studierea funcției sau structurii unui organism și apoi a principiilor în baza cărora se realizează acea funcție, dar și a relației dintre acestea două. Alegerea materialelor necesare dezvoltării unui model biomimetic trebuie să aibă în vedere baza de date cu materiale deja cunoscute. Relația dintre structura și funcția unui organism se reflectă în starea suprafeței, care poate fi analizată prin microscopie electronică (SEM). Aceste detalii pot avea un rol important în cunoașterea organismului și apoi în dezvoltarea unui model biomimetic. Cercetătorii din Statele Unite ale Americii folosesc ca bază de date în studiul biomimeticii ierarhizarea prezentată în figura 2.

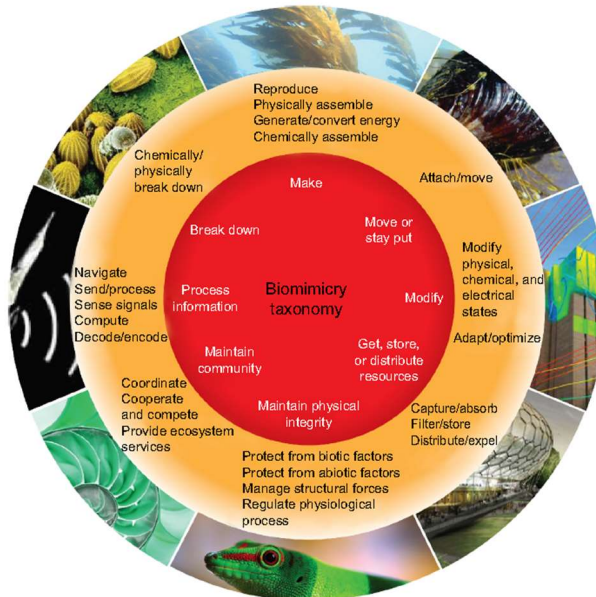


Figura 2. Aspecte ale Bionicii în funcție de aria de interes (Hwang et al., 2015)

În prezent, provocarea cu care se confruntă Bionica este cunoașterea modului în care micro și nano- structurile relaționează cu organismul și mediul. Identificarea diferitelor mecanisme de funcționare și de adaptare la mediul înconjurător ale organismelor și a modului de conservare a energiei este următoarea frontieră în cercetare. Un exemplu în acest sens poate fi stratul antireflexiv din ochii unei molii ce are la bază structuri de 200 nm ce reflectă razele de lumină (Lee and Graham, 1986; Todd et al., 2001). Descoperirea de noi materiale va conduce la dezvoltarea de noi modele și produse biomimetice (Hwang et al., 2015; Malshe et al., 2018).

Studiul Bionicii se referă mai degrabă la implementarea unei funcții găsite în natură decât la imitarea structurilor biologice. De exemplu, în informatică, cibernetica încearcă să modeleze mecanismele de feedback și control care sunt obligatorii în dezvoltarea unei structuri inteligente, în timp ce inteligența artificială (AI) încearcă să modeleze funcția inteligentă indiferent de modul în care este realizată.

Copierea conștientă a exemplelor și mecanismelor din natură este o formă de raționament bazat pe studiu de caz, tratând natura însăși ca pe o bază de date cu soluții care deja funcționează cu un grad ridicat de perfecționare.

În general, există trei niveluri biologice în fauna sau flora planetei din care tehnologia poate prelua și modela:

- Imitarea metodelor naturale de fabricație
- Imitarea mecanismelor și fenomenelor din natură
- Studiarea principiilor organizatorice din comportamentul social al unor viețuitoare, cum ar fi deplasarea stolurilor de păsări în zbor, comportamentul de turmă la animale, cooperarea pentru asigurarea hranei și inteligența furnicilor și roiurilor de albine, comportamentul unui banc de pești.

Bionica este centrată pe ideea că nu există un model mai bun decât cel din natură pentru a dezvolta ceva nou iar rezultatele sunt deja vizibile în viața omului. Într-o primă fază, trebuie analizate soluțiile pe care le-a găsit natura și apoi implementate de om, ținând cont de anumite condiții specifice produsului ce urmează a fi dezvoltat. Acest lucru nu implică o copiere exactă a naturii ci mai degrabă o adaptare a produsului la cerințele impuse. Din acest motiv, colaborarea dintre biologi și ingineri este un aspect important în implementarea și conceperea unui produs cât mai eficient. Datorită caracterului interdisciplinar, bionica se poate orienta în diverse direcții, precum bionica structurilor (construcții din natură), bionica proceselor (metode și procese din natură) și bionica informației (mijloace de transfer a informației, strategii de dezvoltare și evoluție) (BIOKON, Bionics Competence Network).

Bionica poate reprezenta un concept și un instrument practic puternic în dezvoltarea de noi materiale. Un material bionic trebuie desigur să prezinte una sau mai multe proprietăți fizice și chimice, care să fie optimizat și adaptat pentru o aplicație specifică. Totuși, ideea unui material multifuncțional a devenit din ce în ce mai ușor de abordat de către ingineri datorită tehnologiilor actuale de manipulare a structurilor la scară micro și nano în vederea modificării proprietăților. Acest aspect a fost întărit de mai multe exemple din natură (Jeronimidis, 2000), precum de structura ierarhică a colagenului. Bineînțeles că trebuie să se țină seama de costul de producție, durata de viață, costurile de întreținere și, la sfârșitul utilizării, de aspectul de reciclare care trebuie impus ca o proprietate suplimentară a materialului (Reed et al., 2009).

Obținerea setului de proprietăți dorite la un material nou creat necesită atât alegerea ingredientelor (compoziției) potrivite cât și a procesului de fabricație adecvat care să permită ingredientelor să formeze microconstituenți (faze) cu morfologie potrivită, la nivelul scării potrivite (Callister, 2007).

Din punct de vedere al ingineriei materialelor, bionica adoptă premisa că materialele naturale (de la procesul care a dus la obținerea lui până la utilizator) au evoluat într-o perioadă foarte lungă de timp, în condiții care favorizează utilizarea eficientă a resurselor disponibile și care, prin definiție, sunt biocompatibile. Dacă un material natural este mai eficient decât omologul său sintetic existent, atunci ar trebui luat în considerare materialul bionic. În acest context, a fi mai eficient înseamnă a avea proprietăți îmbunătățite, a folosi mai puțină materie primă, a fi mai ieftin și mai robust și nu în ultimul rând a fi mai prietenos cu mediul, sau pur și simplu mai puțin toxic (Reed et al., 2009).

Amploarea simbiozei dintre tehnologie și biologie a fost investigată din punct de vedere cantitativ (Vincent et al., 2006) arătând că tehnologia actuală rezolvă probleme în mare măsură cu ajutorul energiei, în timp ce biologia se bazează în mare măsură pe structură și stocarea informației. Această analiză este utilă deoarece ne ajută să ne concentrăm asupra aspectelor lumii naturale (proces) care ar putea fi cel mai ușor transferabile către tehnologie prin punerea în practică a bionicii (Reed et al., 2009).

2. Începuturile Bionicii

Deși o regăsim adesea în viața de zi cu zi, bionica este un domeniu larg cu o istorie îndelungată. Dacă privim cu mult timp în urmă, la oamenii preistorici, aceștia și-au procurat arme de vânătoare, precum cuțite, sulite sau topoare, privind la colții și ghearele animalelor prădătoare de la acea vreme (Figura 3).



Figura 3. Arme de vânătoare inspirate de la animale prădătoare

Dorința de a zbura dăinuie încă din mitologia greacă, când Daedalus și fiul său Icarus au vrut să scape din Creta folosind niște aripi pe care Daedalus le-a confecționat din pene și ceară. Icarus nu a respectat recomandările tatălui său de a nu zbura prea jos, ca nu cumva umiditatea mării să-i îngreuneze aripile, dar nici prea sus, deoarece căldura de la soare va înmuia ceara din aripi, și astfel el se prăbușește în mare și se îneacă.

În anul 1511, Leonardo da Vinci scria: „Pasărea este un instrument ce funcționează după legi matematice. Unui astfel de instrument construit de om nu-i lipsește decât viața, dar aceasta poate fi suplinită de om” (Seireg, citat de Gheorghe, 1990). Leonardo da Vinci (1452 – 1519) a studiat în detaliu zborul și a propus mai multe variante de aripi care aveau la bază structura aripilor de liliac, pe care el o considera mai eficientă datorită greutateii reduse și naturii impenetrabile a membranei. Astfel, a proiectat aparate de zbor care puteau fi ridicate de la sol folosind forța umană dar și o parașută și un deltaplan (Figura 4).

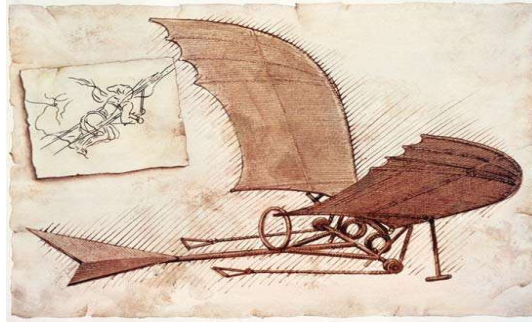
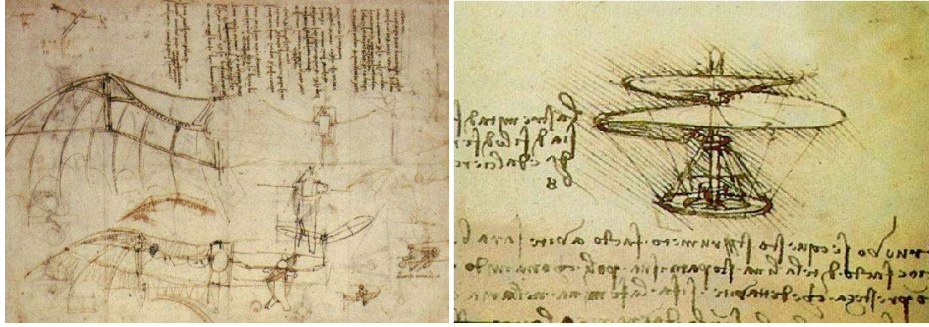


Figura 4. Schițe care ilustrează aparate de zbor

În estul îndepărtat, generalul coreean Yi Sun-Sin a îmbunătățit modelul unui vas de luptă inspirat din forma carapacei broaștei țestoase (Figura 5), modelul fiind adoptat anterior în timpul domniei regelui Taejong, pentru a se lupta cu japonezii în timpul invaziilor (1592 – 1598).

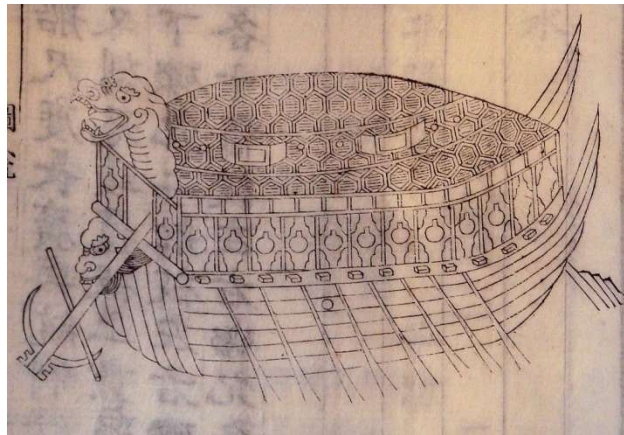


Figura 5. Vas de luptă inspirat din forma țestoasei

3. Bionica în prezent

Societatea modernă este guvernată de o economie și un stil de viață ne-sustenabil față de planetă, drept dovadă stau efectele negative produse de industrializarea galopantă din ultimele decenii. Prin urmare, este necesară o transformare substanțială în toate planurile societății pentru a proteja mediul înconjurător și resursele pământului. Aria tehnologică și inovarea sunt domenii esențiale prin intermediul cărora putem lua măsuri împotriva acestor provocări (Wommer și Wanieck, 2022).

Biomimetica este un domeniu de graniță cu valențe multidisciplinare care în ultimele două decenii a arătat soluții inovatoare remarcabile ce încurajează sustenabilitatea. Studiile și proiectele de cercetare au devenit numeroase în diverse domenii precum medicină, materiale și tehnologia suprafețelor, robotică, arhitectură ș.a. La fel cum natura a găsit soluții și strategii pentru a eficientiza consumul de material și energie, putem învăța de la aceste modele biologice să găsim soluții sustenabile la provocările din societate (Wommer și Wanieck, 2022).

S-au depus eforturi pentru a cuantifica aportul biomimeticii asupra dezvoltării sustenabile durabile dar și pentru a evalua și identifica dacă și cum pot contribui la sustenabilitate soluțiile biomimetice dar și dificultățile care pot apărea. Aceste evaluări au mai multe valențe și anume, evaluarea ciclului de viață (Life Cycle Assessment - LCA), evaluarea sustenabilității produsului (Product Sustainability Assessment - PROSA) sau dezvoltarea de noi abordări, precum evaluarea sustenabilității bio-inspirată (Bio-inspired Sustainability Assessment - BiSA) sau alte unelte. Există soluții biomimetice precum vopsele de exterior rezistente la apă inspirate de frunza florii Lotus, care arată o oarecare sustenabilitate, însă transferul metodologiei către alte proiecte și domenii de dezvoltare poate fi dificil. Prin urmare, trebuie studiat mai mult pentru a înțelege și a analiza modul în care biomimetica privește sustenabilitatea în procesele de dezvoltare. Un aspect interesant al biomimeticii este că progresul științifico-tehnologic poate fi legat de inovarea durabilă și responsabilă fără a utiliza modelul biologic în sine, atât timp cât acesta nu face parte din soluție (Wommer și Wanieck, 2022).

Între anii 2019 – 2022, asociația germană de cercetare BayBionik a avut ca scop dezvoltarea de produse și procese biomimetice destinate protecției mediului. Astfel, proiectele desfășurate la universități din Germania s-au axat pe modificarea caracteristicilor bunurilor și serviciilor, modificări ale tehnicilor de producție sau de reciclare. Scopul a fost implementarea cu succes a principiilor biologice în tehnologie care să conducă la produse și procese mai ecologice sau mai puțin dăunătoare pentru mediu. BayBionik a fost finanțată de Ministerul Mediului și Protecției Consumatorului din Germania pentru a dezvolta inovații durabile în cadrul departamentelor de cercetare din instituții academice. Temele proiectelor au abordat următoarele aspecte (Wommer și Wanieck, 2022):

- Suprafețe cu auto-curățare inspirate de frunzele de Lotus care să împiedice aderența murdăriei sau a organismelor vii, ca de exemplu midiile de nave, melcii sau gheața de jgheaburi. Proiectul a fost implementat la Friedrich-Alexander - Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)
- Suprafețe durabile folosind straturi de acoperire care să se regenereze. Proiectul a fost implementat la Deggendorf Institute of Technology (DIT)
- Bio-ceramice. Dezvoltarea unui proces de biosinteză de materiale ceramice asemeni structurilor multistrat biologice (cochiliile de scoici sau de midii) ca straturi bioactive cu aplicații în implanturi medicale. Proiectul s-a implementat la Friedrich-Alexander - Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

- Fibre optice din pânză de păianjen și celuloză (BionOptik) împărțit în două sub-proiecte implementate la University of Bayreuth și Technical University of Munich
- Articulație robotică rotativă inspirată din mișcarea amplă a gâtului bufniței pentru implementarea în roboți industriali și medicali. Proiectul a fost implementat la Technical University Nuremberg

Activitățile coordonatorului de proiect au inclus încurajarea cooperării și comunicării între diferite echipe de cercetare, identificarea sinergiilor precum și a asemănărilor și diferențelor în abordările de cercetare, sprijinirea grupurilor de cercetare pentru a merge către sustenabilitate, exploatarea potențialului de sustenabilitate a biomimeticii, și ajutor la depășirea provocărilor inter și transdisciplinare (Wommer și Wanieck, 2022).

Domeniul fascinant al Bionicii a atras numeroase cercetări din diferite arii tehnice și ingineresti materializate cu produse inovative și cu aplicabilitate în viața reală. Interesul oamenilor de știință a condus la dezvoltarea unor organizații și rețele care promovează la nivel global această disciplină.

Un exemplu este compania FESTO care a dezvoltat o abordare integratoare a educației STEM pentru a ajuta școlile în educația tehnologică a tinerilor. Această abordare se referă la integrarea tehnologiilor actuale ce au la bază activități practice și folosirea de instrumente digitale, cu soluții inovatoare de învățare care promovează competențele secolului 21 și oferă o perspectivă bogată a locurilor de muncă moderne în aria tehnologică (<https://stem.festo.com/us/en/our-approach/index.html>).

Abordarea integratoare conține mai multe direcții printre care și cea legată de granița dintre biologie și tehnologie în care compania a dezvoltat trei proiecte referitoare la Bionică:

- **Bionic Learning Network** fondată de compania FESTO în 2006 după ce au depus eforturi și au făcut investiții considerabile în cercetarea modelelor bionice încă din anii 1990. Această rețea reprezintă o colaborare a companiei FESTO cu universități renumite, institute de cercetare și investitori privați, care urmărește studierea și dezvoltarea de produse și modele bionice cu aplicabilitate în domeniul automatizării. În procesul de fabricație, partea de automatizare realizează operații tipice precum apucare, manipulare și poziționarea unor produse dar și reglarea și controlul proceselor. Privind în natură observăm că aceste operații sunt deja perfecționate și eficientizate și putem învăța din ele. De asemenea, Bionic Learning Network este strâns legată de procesul de inovație din cadrul companiei prin departamentul FESTO Didactic care se implică în educație și formare tehnică (<https://stem.festo.com/us/en/our-approach/bionics/bionics-learning-network/index.html>).

- **Bionics4Education** prin care compania FESTO se implică major și în promovarea Bionicii în rândul tinerilor prin pachete educaționale orientate pe exemple practice și combinate cu metodele digitale de predare-învățare. Aceste pachete conțin diverse prototipuri de modele bionice din care tinerii încă din școală își pot dezvolta diverse abilități precum creativitatea, lucru practic și interdisciplinar,

orientare spre rezolvarea problemei, gândire critică, lucru cu echipamente digitale. În figura 6 sunt ilustrate câteva exemple de pachete educaționale cu modele bionice produse de FESTO (<https://stem.festo.com/us/en/our-approach/bionics/bionics4education/index.html>).

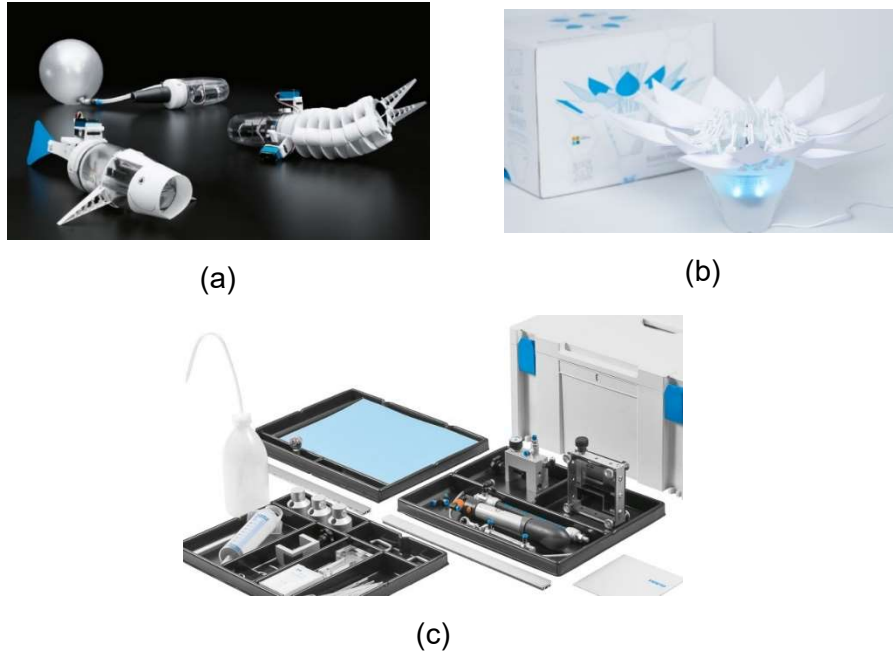


Figura 6. Kit-uri educaționale experimentale: a) robot pește; b) robot floare; c) kit cu 6 principii bionice (FESTO)

- **Bionic Projects by FESTO** în care compania a dezvoltat prototipuri robot inspirate din natură (<https://stem.festo.com/us/en/our-approach/bionics/bionic-projects-by-festo/index.html>).

Privind la complexitatea viețuitoarelor și structurilor din natură, se poate afirma că bionica, sau biomimetica, este disciplina tehnologică a viitorului atrăgând după sine numeroase fonduri pentru proiecte de cercetare. Companii mari precum Ford, General Electric, Herman Miller, HP, IBM și Nike colaborează cu oamenii de știință și laboratoare de cercetare pentru a explora noi tehnologii (Hwang et al., 2015).

Promovarea coexistenței omului cu natura face ca aspectele economice, de mediu și sociale să atragă modele bionice. Țările dezvoltate investesc mult în cercetare pentru a construi bazele viitoarelor inovații și dezvoltări în biomimetism (Hwang et al., 2015).

Janine Benyus a fost aceea care a pus bazele unei Institut de Biomimetică (<https://biomimicry.org>) prin care să promoveze în rândul cercetătorilor soluțiile pe care le poate oferi natura la problemele noastre tehnice. De asemenea, ea este și co-fondatorul rețelei Biomimicry 3.8 (<https://biomimicry.net/>) alături de dr. Dayna Baumeister, care dorește să ofere consultanță și să interconecteze cercetători din diverse arii.

De asemenea, și în Germania, 28 de institute de cercetare în bionică s-au unit pentru a crea BLOKON. Organizația este finanțată de Ministerul Educației și

Cercetării, 35 de proiecte de cercetare fiind încheiate cu produse sau tehnologii biomimetice.

Produsele biomimetice dezvoltate până acum sunt inspirate în special din procese la scară micro sau nano. Datorită progresului în nanotehnologii, se așteaptă în continuare dezvoltarea de produse spectaculoase.

4. MODELE BIONICE INSPirate DIN NATURĂ

Datorită diversității și complexității sistemelor biologice, numărul de modele ce ar putea fi imitate este foarte mare și astfel, bionica sau biomimetica poate fi aplicată în multe domenii. Aplicațiile se regăsesc în diverse stadii de dezvoltare, de la tehnologii care se pot regăsi pe piață sub diverse produse la prototipuri (Bhushan, 2009).

4.1 Ecolocația la animale

Liliecii, delfinii, balenele și unele păsări folosesc ecolocația pentru a se deplasa, orienta și găsi hrana dar și pentru a comunica. Animalul emite o serie de sunete cu frecvență înaltă care ricoșează de obiecte sau obstacole și revin sub formă de ecou fiind detectate de urechi sau alți receptori senzoriali. Obiectul este localizat cu mare precizie datorită direcției ecoului și timpului scurs între emisia și recepția sunetului (Perkins, 2005; Goodyer, 2018; Starkhammar et al., 2011; Reinhold et al., 2018).

Liliacul este un mamifer mic ce posedă un faringe cu mușchi puternici care permit o tensionare foarte mare a corzilor vocale subțiri și dure. Astfel, rezultă vibrații de înaltă frecvență de până la 70 000 Hz, care nu pot fi auzite de om (spectrul auditiv la om este între 16 și 20 000 Hz), dar pot fi percepute de urechile liliacului prin intermediul unei structuri numite melc, care amplifică și transformă undele acustice în semnale electrochimice (Figura 7). La detectarea unei posibile prăzi, de exemplu o insectă, numărul semnalelor emise atinge și 250 pe secundă și astfel se ajunge la o urmărire în timp real a prăzii, care nu are nici o scăpare (un liliac poate înghiți și 175 de insecte în 15 minute, adică una la fiecare 5 secunde) (Starețu, 2016).

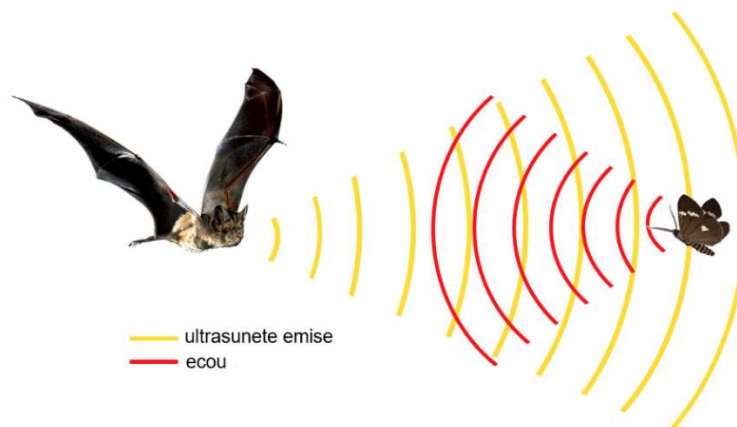


Figura 7. Ecolocația la liliac

(<https://www.sciencelearn.org.nz/images/4184-bat-echolocation>)

Cercetătorii de la Universitatea Johns Hopkins din Maryland au descoperit că lilieci pot să anticipeze unde va ajunge prada pe care o urmăresc pe baza traiectoriei precedente, vitezei de zbor și obstacolelor care sunt în cale. O mai bună

Înțelegere a modului de deplasare și percepție a liliecilor va permite dezvoltarea unor dispozitive care să ajute în viața de zi cu zi pe persoanele nevăzătoare.

Delfinii se folosesc de propagarea undelor ultrasonice în apă pentru a calcula forma și mărimea unui obiect, distanța și direcția acestuia pentru a găsi hrană sau pentru a comunica chiar și în ape turburi. În partea frontală a capului se află melonul, un țesut gras cu lichid, care funcționează ca o lentilă prin care sunetul este focalizat. Sunetele de diferite frecvențe sunt create în sacii nazali și canalizate prin melon iar apoi sunt transmise prin apă către obiectul de interes.

Undele reflectate de obiect se întorc către delfin care le preia cu ajutorul maxilarului și apoi cu urechea internă ce transmite semnalul la creier care traduce sunetul într-o imagine (Figura 8). Când mai mulți delfini se apropie de aceeași sursă de hrană, delfinul dominant transmite niște sunete ca un fel de pocnituri pentru a avea întâietate. Undele acustice emise de delfini pot fi sub forma unor fluierie atunci când comunică între ei sau sub formă de cicluri de unde atunci când caută hrană.

De asemenea, prin intermediul ultrasunetelor, delfinii pot distinge și materialul din care este făcut un obiect. De exemplu, dacă localizează o persoană, aceștia îi pot vedea țesutul muscular, osos, eventuale tije metalice din corp și multe alte detalii subtile care să îi permită să facă diferența cu o altă persoană. Ecolocația la delfini este mult mai eficientă deoarece propagarea sunetului în apă se face cu viteză mai mare (aproximativ 1500 m/s) decât în aer (aproximativ 340 m/s).

Balenele folosesc și ele ecolocația pentru a se orienta și găsi prada însă, ele sunt capabile să emită ultrasunete așa de puternice încât prada poate ameți (Perkins, 2005; Goodyer, 2018; Starkhammar et al., 2011; Reinhold et al., 2018).

Cercetătorii au descoperit o evoluție genetică similară la lilieci și delfini, chiar dacă sunt specii atât de diferite, care arată că există o genă cheie ce controlează caracteristicile urechii interne, genă care s-a dezvoltat într-un mod asemănător la cele două specii. Abilitatea lor de a avea un auz foarte fin care să perceapă ultrasunetele este codată la nivel de ADN de o proteină denumită "prestin", ce a suferit mutații identice la lilieci și delfini. În plus, o serie întregă de aminoacizi au evoluat în paralel (Perkins, 2005; Kaveh and Farhoudi, 2013).

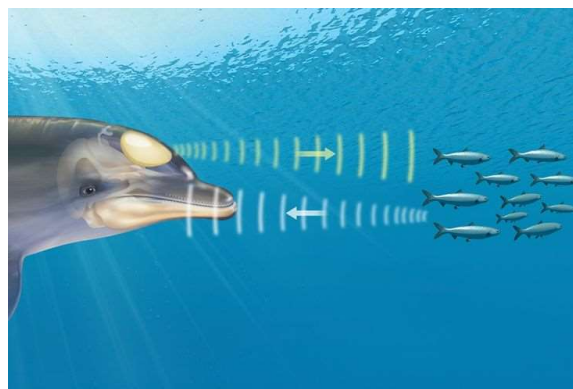


Figura 8. Ecolocația la delfini (Cancun Snorkeling, 2022)

Cercetătorii au studiat ecolocația la animale și au dezvoltat radarul și sonarul care sunt astăzi folosite în ocean sau pe uscat pentru a naviga și găsi obiecte. De

exemplu, ambarcațiunile navale care desfășoară activități de pescuit posedă sonare pentru a detecta bancurile de pești din apă sau submarinele care detectează mine de pe fundul oceanului sau cartografiază oceanul (Figura 9).

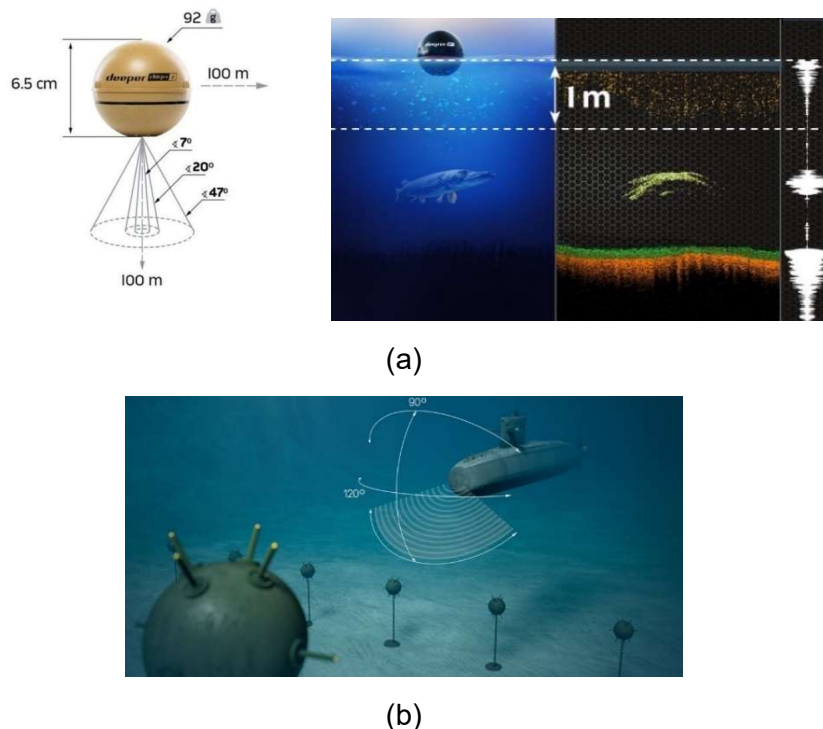


Figura 9. Ecolocația folosită la sonare pentru pescuit (a) (Deeper, 2024) și sonare pentru submarine și detectarea de mine în ocean (b) (Konsberg, 2024)

4.2 Ecolocația în medicină

Utilizarea ultrasunetelor s-a dovedit deosebit de utilă și în medicină unde s-au dezvoltat tehnici de investigație prin imagistică cu ultrasunete pentru a evalua diverse organe interne. Aceste tehnici sunt sigure și nu sunt dăunătoare pentru om deoarece sunetul este o radiație neionizantă. Astfel, cu ajutorul ultrasunetelor se poate măsura pulsul sau se pot investiga diferite tipuri de țesuturi.

Ultrasunetele penetrează țesuturile fiind absorbite sau atenuate mai mult sau mai puțin (Figura 10), în funcție de consistența țesutului și frecvența ultrasunetelor. Frecvențele joase sunt absorbite mai puțin în detrimentul frecvențelor înalte. Pentru țesuturi mai în profunzime se recomandă frecvențe joase, sub 6 MHz, pe când pentru țesuturile mai aproape de suprafață sunt potrivite frecvențele înalte. Pe măsură ce unda trece prin țesut, aceasta își pierde din putere iar distanța pe care o parcurge până ajunge la jumătate din puterea inițială depinde de tipul de țesut, ca de exemplu, în apă este 380 cm, în sânge este 1,5 cm, în țesuturile moi este 3 cm, în mușchi este 0,8 cm, în oase este 0,5 cm iar în plămâni este 0,05 cm.

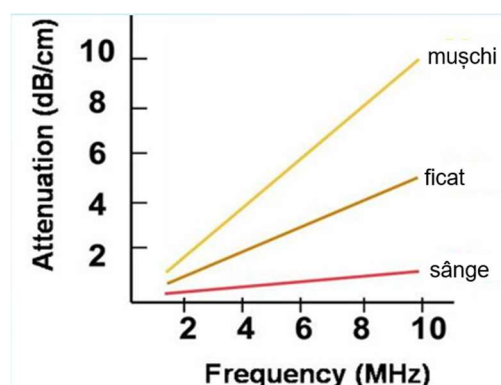


Figura 10. Gradul de atenuare a undelor acustice în țesuturi (Singhal, 2015)

Alți parametri sunt viteza sunetului (c) și impedanța acustică ($Z=c \cdot \rho$) pentru diverse țesuturi (Tabelul 1). În mediile puternic compresibile, precum aerul, sunetul circulă cu viteză mai mică decât în mediile mai puțin compresibile, cum sunt oasele (Gosling, 1989; Singhal, 2015).

Dacă impedanțele acustice a două medii prezintă diferențe mari atunci fasciculul de unde reflectat va avea energie mare. De exemplu, granița dintre aer-țesut sau os-țesut va reflecta aproape toată energia. Apa, mușchii și grăsimea reflectă puțin și absorb undele ceea ce le face mai puțin vizibile pe ecografii. În Tabelul 2 este prezentat gradul de reflectivitate la granița dintre țesuturi.

Tabelul 1. Parametri sunetului prin diferite medii (Gosling, 1989)

Mediu	Viteza sunetului c (m/s)	Impedanța acustică Z (10^6 kg/m ² ·s)
Aer	330	0,0004
Grăsime	1450	1,38
Apă	1480	1,48
Creier	1541	1,58
Sânge	1570	1,61
Rinichi	1561	1,62
Ficat	1549	1,65
Mușchi	1585	1,7
Os craniu	4080	7,8

Tabelul 2. Reflectivitatea la granița dintre diferite țesuturi (Singhal, 2015)

Interfața	Reflectivitatea
Creier – Osul craniului	0,66
Grăsime – Mușchi	0,1
Grăsime – Rinichi	0,08
Mușchi – Sânge	0,03
Țesut moale – Apă	0,05
Țesut moale – Aer	0,9995

Ecografiile sunt imagini formate din ecourile reflectate de țesuturi. Reprezentarea ecoului ca răspuns a țesutului la un fascicul cu ultrasunete se poate face ca amplitudinea semnalului în funcție de timp sau, cel mai adesea, ca imagine 2D în scară de gri în funcție de distanța de penetrare în țesut. Un exemplu este ramura medicală de obstetrică unde ecografia fătului poate oferi indicii importante despre evoluția acestuia. (Gosling, 1989; Singhal, 2015).

4.3 Roboți bionici

Păsările dețin un sistem remarcabil de orientare care le permit, de exemplu păsărilor migratoare, să brăzdeze planeta în lung și-n lat, parcurgând distanțe foarte mari fără să se rătăcească, chiar de la un pol la altul, cum este cazul rândunicii arctice, care migrează anual între Polul Nord și Polul Sud, parcurgând o distanță de aproximativ 70900 km. Prin similitudine, omul a dezvoltat sistemul GPS (Global Positioning System), care permite o orientare și o poziționare destul de exactă, fiind însă un sistem deosebit de complex (Starețu, 2016).

Pe de altă parte, zborul păsărilor a fost și el imitat și au fost dezvoltate numeroase variante de aparate de zbor, dotate cu aripi. Avioanele au beneficiat de îmbunătățiri ale aripilor, în special la vârful lor care a devenit îndoit, winglet, asemeni păsărilor răpitoare. Acest winglet de la vârful aripii reduce vârtejurile și rezistența la înaintare, crește manevrabilitatea și stabilitatea în aer și reduce și consumul de combustibil.



(a)



(b)

Figura 11. (a) Pescăruș robot; (b) Vulpe zburătoare robot (FESTO)

Compania FESTO a dezvoltat un robot cangur (BionicKangaroo) care imită deplasarea prin sărituri a unui cangur real (Figura 12). Robotul salvează energie la fiecare săritură folosindu-se de ea pentru a realiza pe următoarea, similar cum face cangurul real. Fără această abilitate, cangurul real ar obosi foarte repede, însă își folosește tendoanele ca pe niște arcuri realizând sărituri pentru perioade lungi de timp.



Figura 12. Robot cangur (FESTO)

Robotul cangur folosește și el arcuri care se "încarcă" parțial la aterizare. Întregul robot cântărește doar 7 kg și are înălțimea de 1 m iar o săritură are amplitudinea de 0,4 m pe verticală și 0,8 m pe orizontală. Energia necesară propulsării este realizată de un compresor care furnizează o presiune ridicată către actuatoarele pneumatice de la nivelul picioarelor. Partea electronică este alimentată de o baterie plasată la nivelul cozii. Elementele componente ale robotului pot fi observate în figura 13 (Ackerman, 2014).

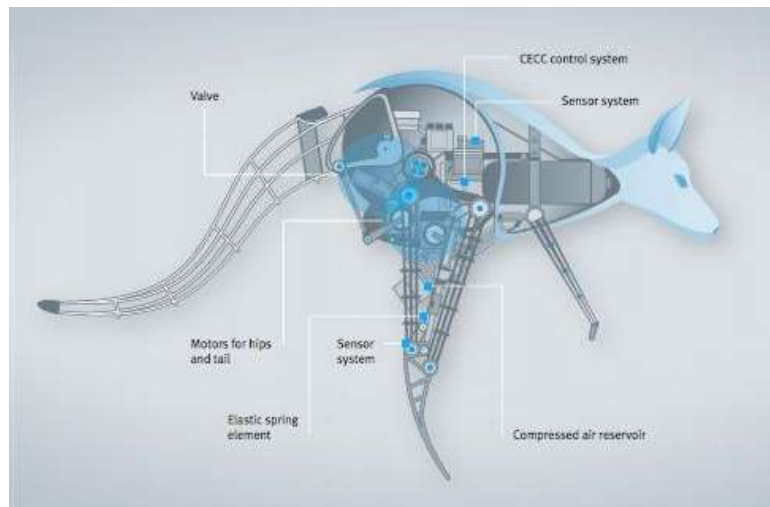


Figura 13. Structura robotului cangur (FESTO)

Metodologia de deplasare prin sărituri presupune următoarele faze (Figura 14):

a) Desprinderea de la sol și faza de zbor (salt)

Înainte de primul salt, tendoanele elastice sunt pretensionate. Robotul își schimbă centrul de greutate spre înainte și începe să se încline. Odată ce se atinge un anumit unghi de înclinare spre înainte cu o anumită viteză unghiulară, sunt acționați cilindrii pneumatici iar energia din tendoane este eliberată și robotul se desprinde de sol.

Pentru a sări cât mai departe, cangurul își trage picioarele spre înainte în timpul saltului sau fazei de zbor. Acest lucru creează un moment de torsiune în motoarele de la nivelul șoldului, pe care robotul îl compensează cu o mișcare a cozii. Partea superioară a corpului rămâne astfel aproape la orizontală (Ackerman, 2014).

b) Faza de aterizare: energie pentru următorul salt

La aterizare, tendoanele sunt din nou tensionate transformând astfel energia cinetică a saltului în energie potențială. Energia este stocată în baterie și poate fi folosită pentru următorul salt. Faza de aterizare este momentul critic pentru recuperarea de energie fiind responsabilă de comportamentul eficient al cangurului. În această fază, coada se deplasează spre sol și astfel înapoi în poziția de pornire (Ackerman, 2014).

Dacă cangurul continuă să sară, acesta folosește energia stocată anterior pentru următorul salt. Energia potențială de la tendoanele elastice este utilizată din nou în acest moment. Supapele comută la momentul potrivit și începe următorul salt. În acest fel este nevoie de mai multe sărituri una după alta. Dacă robotul ajunge în poziția de repaus nemișcat, trebuie să absoarbă cât mai multă energie posibil. Pentru a face acest lucru, actuatoarele pneumatice sunt comandate corespunzător și tendoanele sunt tensionate din nou (Ackerman, 2014).

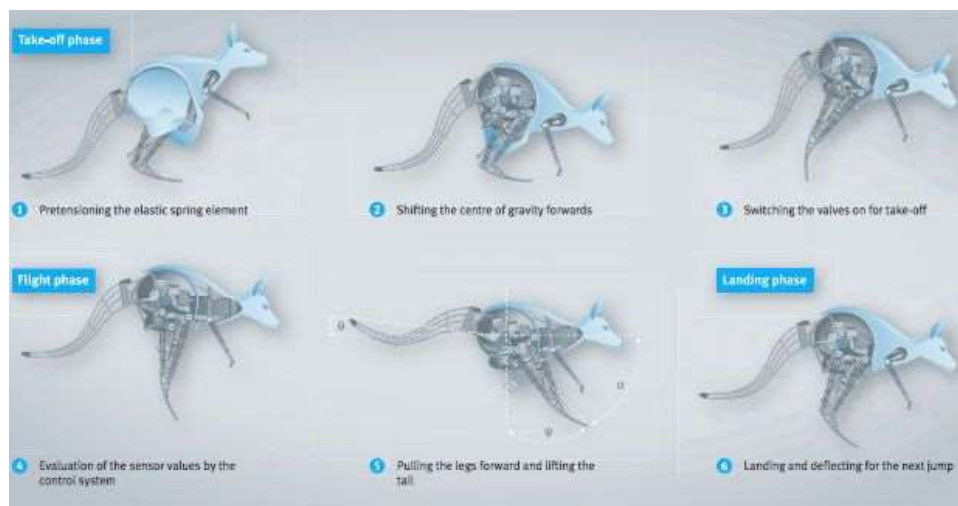


Figura 14. Etapele săriturii robotului cangur (FESTO)

4.4 Aeronave de zbor

Aeronavele sunt aparate de zbor dotate cu aripi de diferite dimensiuni cu suprafața curbată care creează forțe aerodinamice explicate prin efectul Bernoulli. Datorită structurii aerodinamice, viteza fluxului de aer este mai mare pe partea superioară a aripilor decât pe cea inferioară. Avioanele se pot ridica datorită presiunii mari de dedesubtul lor ce se creează atunci când decolează. Acesta a fost principiul care a determinat pe frații Wright (1867 - 1948) să facă primul zbor în 1903 dar și inspirația pe care au luat-o de la zborul păsărilor prădătoare. De asemenea, dacă privim păsările care zboară în stoluri, ca de exemplu găștele sălbatice, ele zboară

într-o formație în V creând un curent de aer ascendent permițând celor din spate să depună mai puțin efort (Alerstam et al., 1990).

Britanicul F.W. Lanchester (1868 - 1946), pasionat de aviație, a propus ca la capătul aripilor să pună o placă verticală cu rol de a reduce vârtejurile create la vârful aripilor (Jupp, 2001). Din păcate conceptul nu și-a demonstrat eficacitatea în practică datorită creșterii rezistenței la înaintare și dispersiei fluxului de aer.

După ce costul combustibilului pentru avioane a crescut vertiginos datorită crizei de petrol din 1973, companiile aeriene și producătorii de avioane au încercat să găsească modalități de a reduce consumul de combustibil prin îmbunătățirea eficienței de zbor a aeronavelor. La sfârșitul anilor 1970, R.T. Whitcomb, inginer la Centrul de Cercetare Langley NASA, inspirat de un articol din revista Science Magazine despre modul de zbor al păsărilor care planează și rolul penelor din vârful aripilor în controlul zborului (Figura 15), s-a preocupat de reducerea rezistenței la înaintare în zborul de croazieră și de a îmbunătăți performanța aeronavei dezvoltând conceptul de "winglet" (Chambers, 2003).



Figura 15. Forme ale aripilor în zbor la păsări: (A) papagal Kea; (B) pelican maro; (C) șoim cu coadă roșie; (D) vultur pleșuv; (E) bufnița nordică; (F) stârcul albastru (Guerrero et al., 2012)

Analiza făcută de Whitcomb asupra curgerii aerului la vârful aripilor a arătat că există un flux direcționat spre interior pe deasupra aripilor și unul spre exterior pe dedesubtul ei. Astfel, Whitcomb a presupus că introducerea unei suprafețe înclinată la nivelul vârfului ar putea folosi curgerea transversală a aerului pentru a reduce vârtejul creat la vârf și prin urmare și ridicarea indusă de rezistența la înaintare. În figura 16 sunt ilustrate diferite variante constructive de aripioare "winglet" utilizate în prezent sau în stadiul de testare (Guerrero et al., 2012).

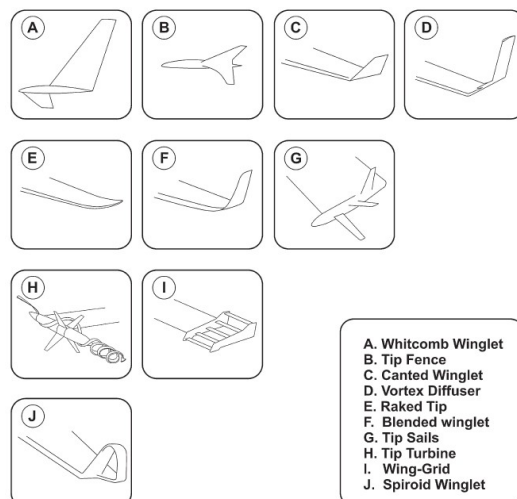


Figura 16. Aripioare tip "winglet" pentru avioane de pasageri sau aeronave militare (Guerrero et al., 2012)

Aeronavele dotate cu aripi winglet au arătat turbulențe mai reduse, rezistență mai mică la înaintare și consum de combustibil mai redus cu până la 3% (Freedman, 1991; Jakab, 1990; Siddiqui et al., 2017).



Airbus A380 winglets, inspired by the Steppe Eagle

Figura 17. Avion Airbus A380 cu aripioare winglet (Siddiqui et al., 2017)

Totuși, performanța aeronavelor este îmbunătățită în mod continuu iar cercetările privind reducerea rezistenței la înaintare cu ajutorul formei aripilor este un subiect deschis cercetărilor (Wan et al., 2006; Nazarinia et al., 2006; Gavrilović et al., 2015). Astfel, Guerrero et al. (2012) au realizat simulări pe aripioare de tip spiroid winglet (Figura 18) iar rezultatele au arătat o reducere a rezistenței la înaintare cu 75% pentru un coeficient de ridicare $C_L=0,95$ și o îmbunătățire a raportului ridicare/rezistență (C_L/C_D) de aproape 7%. Un alt aspect pe care l-au concluzionat cercetătorii legat de aripioara spiroid este acela că aripioara are capacitatea să reducă mult intensitatea vârtejurilor de la vârf, care se disipă foarte repede. Acest lucru ar putea fi de interes pentru gestionarea fluxului de trafic aerian pe aeroporturile mari, deoarece ar reduce distanța necesară dintre aeronave care să permită disiparea vârtejurii în timpul operațiunilor de aterizare și decolare. Pentru producătorii sau operatorii de aeronave, rezultatele obținute ar putea fi înțelese ca:

- Raza de operare crescută
- Performanță îmbunătățită la decolare

- Altitudini mai mari de zbor
- Rata de rulare a aeronavei îmbunătățită
- Rate mai mici de timp până la urcare
- Zgomot mai redus la decolare
- Viteză de croazieră crescută
- Emisii reduse

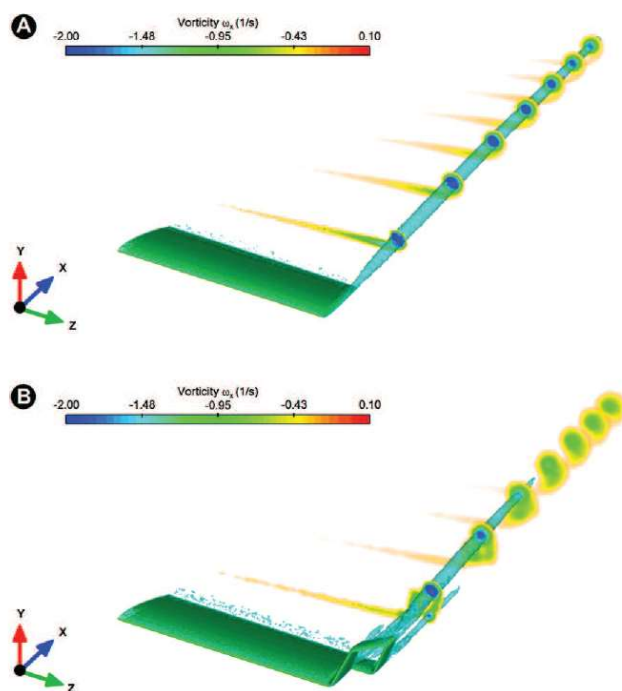


Figura 18. Vârtejurile la vârful aripii obținute prin simulare pentru un unghi de atac (AOA) de 5° : (A) aripi normală; (B) aripi cu winglet (Guerrero et al., 2012)

Există păsări care în timpul zborului produc un zgomot foarte mic. Un exemplu este bufnița care zboară noaptea pentru a-și prinde prada și în timpul zborului, mișcările ariilor produc un zgomot foarte mic. Secretul constă într-o serie de aripi mici cu dinți de fierăstrău care ies din marginea exterioară a penelor principale. Rolul acestor pene este de a reduce vârtejurile mari create la nivelul ariilor în vârtejuri mai mici.

4.5 Trenul de mare viteză

Trenul de mare viteză din Shinkansen din Japonia, introdus în 1964, este cel mai rapid tren din lume și poate atinge o viteză de 320 km/h.

Una din problemele asociate trenurilor de mare viteză este zgomotul pe care îl produc la ieșirea din tuneluri datorită variației de presiune. Acest zgomot poate fi foarte deranjant mai ales în zonele urbane unde există locuințe în vecinătatea liniei de transport.

Inspirat de pasărea *Kingfisher* denumit pescărușul albastru, Eiji Nakatsu a propus modificarea formei locomotivei trenului. Pasărea *Kingfisher* are dimensiuni relativ mici, capul mare și ciocul lung și ascuțit. S-a observat că, atunci când ea

plonjează din aer în apă, rezultă o cantitate neglijabilă de stropi de apă. Care este secretul? Răspunsul este: ciocul lung.

Astfel, noul model de tren inspirat de modelul de cioc al păsării *Kingfisher* a arătat că este mai puțin zgomotos, consumă mai puțină energie, echilibrează mai bine presiunea aerului, este mai rapid și mai confortabil (Figura 19) (Hu et al., 2018).

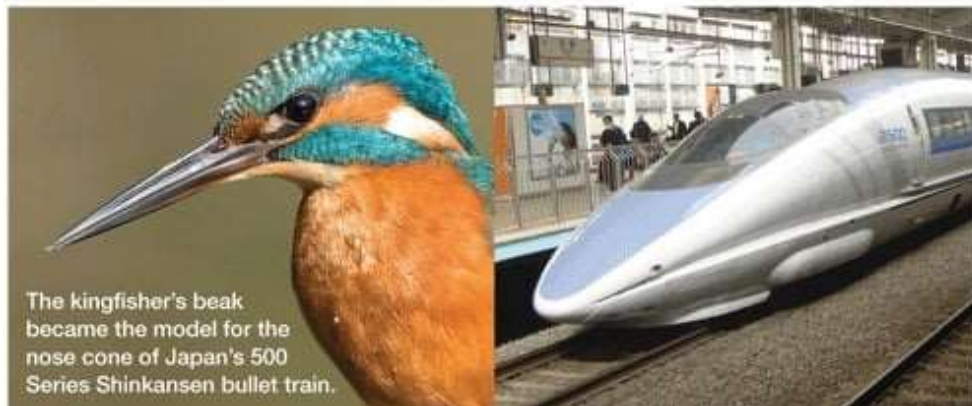


Figura 19. Trenul Shinkansen de mare viteză inspirat de pasărea *Kingfisher* (Hu et al., 2018).

Eoliene

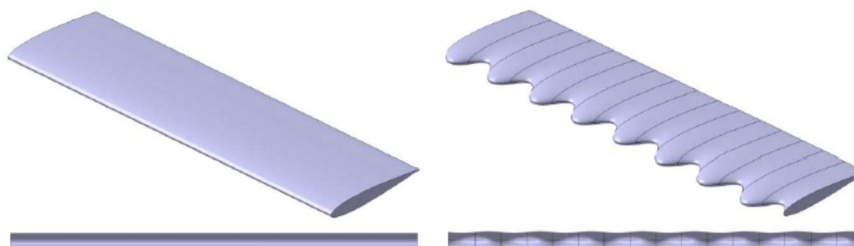
Combustibilii fosili reprezintă o sursă importantă pentru producerea de energie însă efectele negative asupra mediului au condus la necesitatea utilizării unor surse de energii alternative regenerabile cu un impact minim asupra mediului. Energia eoliană este una dintre acestea și presupune producerea de energie cu ajutorul unei surse inepuizabile, și anume, vântul.

Eolienele sunt alcătuite dintr-un stâlp fixat în pământ, o nacelă în interiorul căreia se găsesc elemente mecanice de transmisie pentru amplificarea mișcării și componente electrice, și palele care cu ajutorul vântului se rotesc și antrenează sistemul mecanic. Palele turbinelor în rotație ating viteze mari care la vârf pot ajunge la circa 144 – 289 km/h. Forma palelor a suferit anumite modificări astfel încât aceasta să asigure o eficiență cât mai bună a eolienei. Portanța aerodinamică a palei a fost adaptată după forma înotătoarei balenei cu cocoașă, care prezintă ca niște tuberculi pe marginea frontală (Figura 20) ce o ajută să fie extrem de agilă pentru mărimea ei (greutate de aproximativ 40 de tone și lungime de 15 metri) atunci când vânează, deplasându-se pe traiectorii în formă de spirală curbată, uneori cu diametrul de mai puțin de 10 m. Acest lucru se datorează unghiului de atac pe care îl obține balena în timp ce înoată.

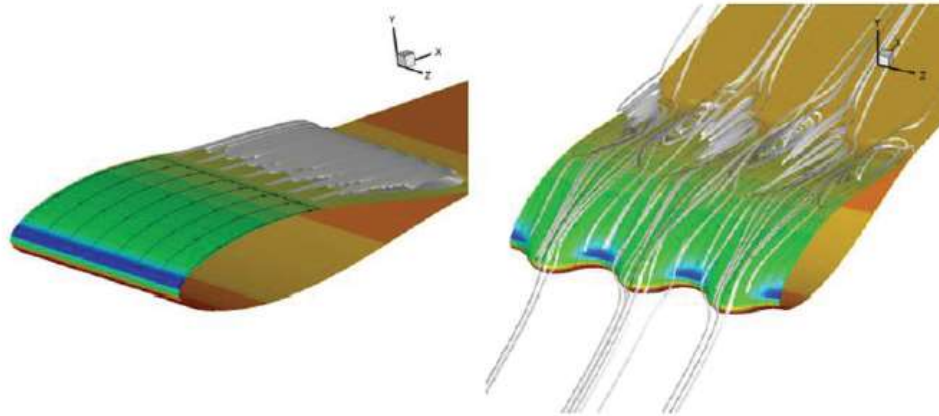


Figura 20. Prototip de pală de eoliană testată de către WhalePower pe insula Prince Edward (Taylor, 2008)

Atunci când unghiul de atac al înotătoarei, sau al unei aripi în cazul avioanelor, devine prea abrupt rezultă un blocaj, care în aviație înseamnă că nu există suficient aer care să treacă peste suprafața superioară a aripii. Acest lucru duce la o rezistență crescută la înaintare și o pierdere a echilibrului, care ar putea rezulta în final la o pierdere în altitudine. Anumite experimente au arătat că unghiul de atac al înotătoarei balenei cu cocoașă poate fi cu până la 40% mai mare decât al unei înotătoare drepte până să apară blocarea. Cercetătorii de la Harvard (Fish et al., 2008) au arătat că tuberculii de pe înotătoare modifică distribuția de presiune la nivelul ei, astfel încât unele zone se blochează înaintea altora la unghiuri de atac diferite, blocare bruscă fiind mai ușor de evitat (Figura 21-a). De asemenea, cercetătorii au descoperit că mărimea tuberculilor joacă un rol mai important decât numărul lor de-a lungul muchiei palei. Testele efectuate în tunelul aerodinamic au demonstrat că blocarea care avea loc de obicei la un unghi de atac de 12° este întârziată datorită tuberculilor până ce unghiul ajunge la 18° . Rezultatele au arătat că rezistența la înaintare a fost redusă cu 32% iar portanța s-a îmbunătățit cu 8%. Rezultate asemănătoare au fost obținute și de Čarija et al. (2014) (Figura 21-b).



(a)



(b)

Figura 21. Pale de turbină: (a) geometria palelor cu margine dreaptă și cu tuberculi (Čarija et al., 2014); (b) distribuția de presiuni și liniile de direcție a particulei pentru $\alpha=10^\circ$ (Fish et al., 2008)

Prototipurile de pale pentru turbinele eoliene au arătat că blocarea întârziată dublează performanța eolienele la viteze ale vântului de aproximativ 27 km/h și permite turbinei să capteze mai multă energie din vânturile cu viteză mică. Tuberculii canalizează mai eficient fluxul de aer peste pale și creează vârtejuri care îmbunătățesc ridicarea. Astfel, eoliana cu prototipul de pale a funcționat cu zgomot mai redus, este mai stabilă și mai fiabilă cu 20% față de cele convenționale (Taylor, 2008).

4.6 Mașina bionică

În prezent, problema eficienței consumului de combustibil la automobile este preocuparea companiilor care încearcă să proiecteze mașini nu numai din punct de vedere estetic ci și al aerodinamicii care contribuie într-un procent de aproape 80% la rezistența totală la înaintare a unui automobil în timpul deplasării. Acest indicator al eficienței aerodinamice, denumit coeficient de tracțiune, a scăzut de-a lungul timpului de la 0,6 în anii 1960 la 0,4 la sfârșitul anilor 1970 până la 0,28 în 2012 (Kozlov et al., 2015).

Inspirându-se după forma peștelui cufăr care îi oferă o aerodinamică deosebită în apă, deși el este un pește lent cu un schelet rigid care nu permite ondulări prea mari ca alți pești, Daimler Chrysler au dezvoltat în 2005 un prototip de automobil bionic care prezintă eficiență ridicată datorită optimizării caroseriei în vederea reducerii rezistenței la înaintare (Figura 22).



Figura 22. Prototipul automobilul bionic (Hwang et al., 2015)

În urma simulărilor și testelor realizate în tunelul aerodinamic (Figura 23), prototipul a arătat un coeficient de tracțiune de 0,1, mult mai mic decât cel al unui automobil obișnuit (Kozlov et al., 2015; Van Wassenbergh et al., 2015; Chowdhury et al., 2019).

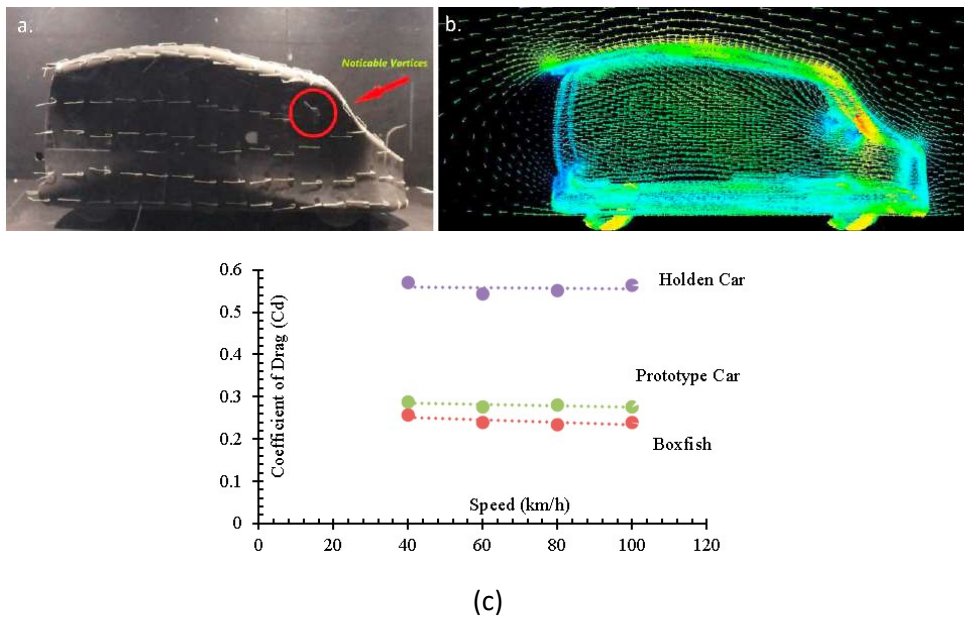


Figura 23. (a) prototipul de automobilul bionic testat în tunel aerodinamic; (b) simulare CFD cu vizualizarea vectorilor viteză; (c) variația coeficientului de tracțiune cu viteza aerului (Chowdhury et al., 2019)

Acest prototip ar putea inspira mai departe conceptele de automobile în vederea eficientizării lor din punct de vedere al aerodinamicii ce duce la scăderea consumului de combustibil și implicit la o poluare mai redusă.

4.7 Materiale superhidrofobe inspirate din frunzele de Lotus

Tensiunea mare de suprafață face ca picăturile de apă să capete o formă aproape sferică, având suprafața de contact minimă, această formă minimizând

energia de suprafață solid-lichid. La contactul unui lichid cu o suprafață rezultă forțe de adeziune care duc la umezirea suprafeței sau absorbția apei. Gradul absorbției apei pe suprafețe este dat de proprietățile intrinseci ale materialului și microstructura suprafeței. Astfel, o suprafață poate să absoarbă foarte bine apa și se spune că este hidrofilă, sau poate să respingă apa și atunci se numește hidrofobă. Caracteristica care definește acest aspect este unghiul de contact (θ_c) care reprezintă unghiul pe care îl face o suprafață lichidă cu una solidă în punctul unde se întâlnesc (Figura 24). Mai exact, este unghiul dintre tangenta de la interfața lichid-aer (γ_{LG}) și tangenta de la interfața solid-lichid (γ_{SL}). Gradul de absorbție a unui lichid de către o suprafață solidă este descris de ecuația Young:

$$\gamma_{SG} - \gamma_{SL} - \gamma_{LG} \cdot \cos \theta_c = 0 \quad (1)$$

Unghiul de contact poate fi exprimat și în funcție de adeziune prin ecuația Young-Dupré:

$$\gamma_{LG} \cdot (1 + \cos \theta_c) = \Delta W_{SLG} \quad (2)$$

Unde ΔW_{SLG} este energia de adeziune solid-lichid pe unitatea de arie.

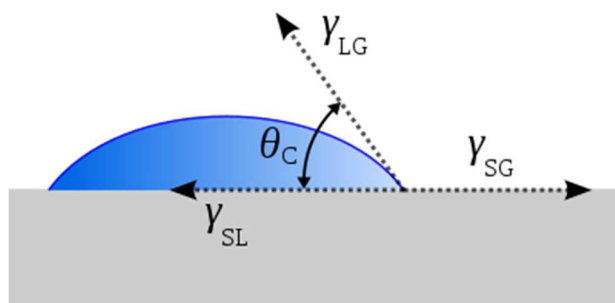


Figura 24. Schema unei picături de lichid în contact cu o suprafață solidă și ilustrarea componentelor ecuației Young (Malshe et al., 2018)

Suprafețele care au $\theta_c < 90^\circ$ sunt hidrofile iar cele care au $\theta_c > 90^\circ$ sunt hidrofobe. Anumite plante au unghiuri de contact de până la 160° ceea ce le face să fie denumite superhidrofobe, ceea ce înseamnă că doar 2-3% din suprafața unei picături este în contact (Malshe et al., 2018).

Cel mai impresionant exemplu este cel al florii de Lotus la care unghiul de contact ajunge la 170° , ceea ce înseamnă că aria de contact a unei picături este de doar 0,6 %. Acest lucru conduce la un efect puternic de auto-curățare. Fenomenul numit *efectul Lotus*, a fost observat de către profesorul Wilhelm Barthlott în 1977, un botanist din cadrul Grădinii Botanice a Universității Boon. Atunci când există particule de murdărie pe suprafața frunzelor, acestea sunt captate de picăturile de apă și îndepărtate foarte ușor (Figura 25-a). Acest efect este deosebit de important pentru plante ca o protecție împotriva agenților patogeni precum ciuperci sau alge, dar și pentru insecte, ca de exemplu fluturii și libelulele, care nu își pot curăța toate părțile corpului. De asemenea, un alt beneficiu al auto-curățării este acela că previne contaminarea suprafeței plantelor expuse luminii ceea ce ar reduce fotosinteza (Bhushan, 2009).

Suprafața frunzei de lotus prezintă un strat cu papile cea au înălțimea de 10-20 μm și lățimea de 10-15 μm acoperite de cuticule de ceară care se regenerează (Figura 25-b).

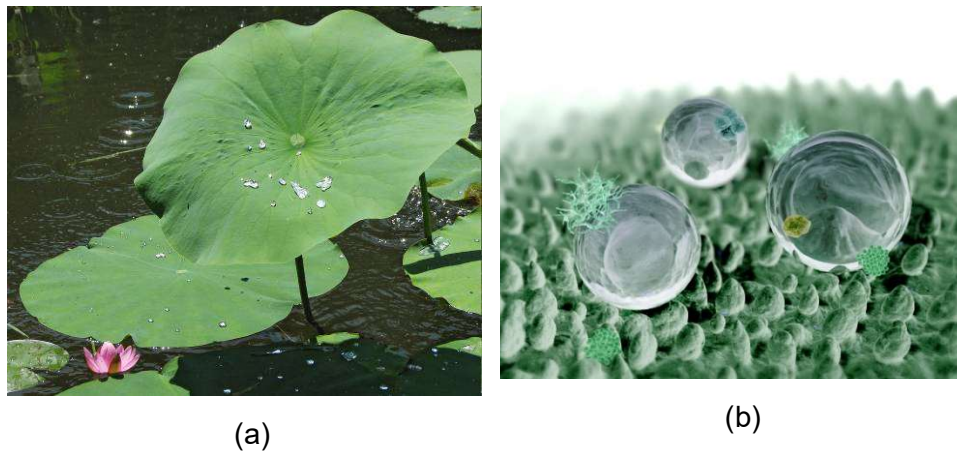


Figura 25. Efectul Lotus: a) auto-curățarea frunzei; b) microstructura suprafeței frunzei (Malshe et al., 2018)

Efectul Lotus de auto-curățare a suprafeței frunzei a deschis nenumărate aplicații în diverse industrii, oamenii de știință dezvoltând tratamente de suprafață, straturi de acoperire, vopsele, țigle pentru acoperiș, materiale textile care pot rămâne curate și uscate. În continuare sunt menționate câteva exemple ce au la bază efectul Lotus.

Compania Evonik a creat vopseaua Lotusan, pe bază de nanoparticule hidrofobe de silicon dispersate într-un liant.

Dotarea cu geamuri cu auto-curățare a stațiilor de control a traficului de pe autostrăzile din Germania.

Compania elvețiană HeiQ și cea de textile Schoeller Textile au dezvoltat în 2005 produsul HeiQ Eco Dry, un articol de îmbrăcăminte tratat cu nano-sfere, rezistent la pete de sos de roșii, cafea sau vin roșu. Petele erau ușor de îndepărtat chiar și după mai multe spălări

Compania BASF din industria chimică a dezvoltat Mincor® TX-TT (Figura 26), un tratament de suprafață pentru textile tehnice (corturi, umbrele, copertine, prelate, steaguri, bannere publicitare, parasolare, vele, pânze ș.a) pe bază de nanoparticule încorporate într-un liant, tratament care ține murdăria departe.

Tratamentul imită papilele de pe suprafața frunzei de lotus care permit rostogolirea picăturilor de apă fără a adera la suprafață. Astfel, particulele de murdărie sunt transportate odată cu cele de apă și eliminate fără a fi nevoie de detergenți. Un astfel de tratament este o soluție ideală pentru produsele textile care sunt expuse în mod frecvent condițiilor de mediu și intemperiilor și nu pot fi puse într-o mașină de spălat. Aversele de ploaie pot pur și simplu spăla murdăria sau dacă perioadele însorite sunt mai prelungite nu este nevoie decât de un furtun cu apă pentru a fi spălate. Produsul textil din poliester tratat cu Mincor® TX-TT este primul produs care îndeplinește standardele pentru textile cu auto-curățare stabilite de Institutul de Textile și Ingineria Procesului Denkendorf (ITV).



Figura 26. *Tratament de suprafață pentru textile cu auto-curățare (BASF Company)*

Descoperirea efectului lotus a condus la studii de cercetare ale morfologiei suprafețelor și pe alte plante sau viețuitoare, cum este cazul petalelor de trandafir care prezintă unghiuri mari de contact cu apa, o cuticulă ca un strat continuu lipidic hidrofob, dar și fenomene de aderență a picăturilor de apă, ceea ce denotă proprietăți antagoniste. Suprafața petalelor prezintă o structură ierarhică formată din pliuri de dimensiuni nanometrice. Coexistența proprietăților de hidrofobicitate și putere de adsorbție este numită *efectul "petale de trandafir"*.

4.8 "Apă din ceață"

Accesul la apă potabilă constituie o problemă pentru o bună parte a populației lumii, ONU estimând că **un miliard de oameni trăiesc fără a avea acces la o sursă stabilă de apă curată**.

Studiind această problemă, o echipă de cercetători de la Massachusetts Institute of Technology (MIT) au dezvoltat o metodă eficientă de extragere a apei potabile din ceață. Cercetătorii au fost inspirați de gândacul de deșert (*Stenocara gracilipes*) din Namibia (Figura 27) care trăiește pe țărmul arid al acestei țări, într-o regiune în care nivelul anual de precipitații este de 40 mm (Malshe et al., 2018). Acest gândac a dezvoltat o metodă unică pentru a obține apă de băut. Dimineța devreme, pe țărmul atlantic al Namibiei se formează ceață ca urmare a interacțiunii dintre aerul fierbinte al deșertului și briza venită dinspre ocean. Gândacul se poziționează pe o dună de nisip cu fața spre briza mării și capul în jos, spre direcția vântului, cu aripile deschise. Pe suprafața aripilor se acumulează picături mici de apă reținute de microstructura hidrofilă. Odată ce picăturile devin suficient de mari cât să învingă forțele de adeziune, ele se rostogolesc prin niște "șanțuri" hidrofobe acoperite cu o substanță ceroasă, ajungând în final în gura gândacului (Bhushan, 2009). Acest model biomimetic a condus la dezvoltarea de sisteme de colectare a apei din ceață de tipul plaselor metalice, 1 m² de plasă metalică putând genera cel puțin 1 litru de apă pe zi, în condiții ideale fiind posibil să se obțină până la 10 litri. De asemenea, acest model l-a inspirat și pe Edward Linacre de la Universitatea Tehnică Swinburne din Melbourne, care a câștigat premiul Internațional James Dyson în 2011 cu sistemul de irigare Airdrop care se referă la pomparea aerului printr-o rețea

de conducte subterane care este apoi răcit astfel încât condensează și apa este direcționată la rădăcinile plantelor. Avantajul acestui sistem este că nu necesită sursă de energie exterioară pentru a fi acționat (Malshe et al., 2018).



Figura 27. Gândac de deșert din Namibia, Africa, model biomimetic pentru sisteme de colectare a apei din ceață (Clark, 2012)

Cercetători de la Universitatea Rochester au creat o tehnologie prin care materialele devin super-hidrofile astfel încât apa este captată de suprafață chiar urmând un curs de jos în sus, contra gravitației. Aceștia au mers mai departe și au propus dezvoltarea unei tehnologii care să creeze materiale hidrofobe și au dezvoltat un metal care respinge apa prin realizarea unei texturi de suprafață la nivel nanometric folosind gravarea cu laser. Picăturile de apă care cad pe suprafața super-hidrofobă a metalului pur și simplu sar ca niște baloane. Fiind mult mai hidrofobă decât teflonul, aplicațiile acestei suprafețe metalice poate revoluționa multe industrii. De asemenea, suprafața micro-prelucrată este mult mai sigură și mai durabilă decât straturile de acoperiri chimice care se exfoliază și se deteriorează în timp. Acoperirile realizate prin gravare cu laser pe fuzelajul avioanelor ar putea împiedica formarea gheții pe aripi sau ar putea menține vasul de wc curat cu un consum redus de apă, mai ales în țările afectate, această din urmă aplicație a atras interesul Fundației Bill & Melinda Gates care a ajutat la finanțarea cercetărilor. În cercetările anterioare, cercetătorii au folosit tehnică similară de modelare cu laser pentru a crea suprafețe ce devin închise la culoare, chiar negre, atunci când captează lumină sau radiație. Combinația acestor proprietăți de absorbție a luminii și de respingere a apei ar putea conduce la realizarea de panouri solare mai eficiente, care nu s-ar coroda și s-ar putea auto-curăța.

4.9 Hipopotamul ne învață să ne protejăm de soare

Deși hipopotamul petrece nenumărate ore în soare, pielea lui nu este afectată de această expunere constantă la radiații ultraviolete. De ce? Cercetătorii de la Kyoto Pharmaceutical University of Japan au descoperit că acesta este protejat de o secreție glandulară, ca un mucus, produsă sub piele și eliminată pe toată suprafața corpului prin pori. Secreția de culoare roșie este formată din două tipuri de acid, acid hiposudoric și acid norhiposudoric (Saikawa et al., 2004). La microscop, "transpirația de hipopotam" prezintă două tipuri de structuri cristal-lichid, brăzdate și nebrăzdate. Cele brăzdate, la un anumit grad de mărire, sunt sub formă de inele întunecate concentrice. Inelele sunt rezultatul unei periodicități structurale care apare la o scară

comparabilă cu lungimile de undă ale luminii vizibile. Asta înseamnă că "transpirația" este un dispersor de lumină, având rol atât de blocare a razelor solare cât și de protecție împotriva lor. De cealaltă parte, structurile nebrăzdate, îmbunătățesc capacitatea transpirației de a se răspândi pe suprafața animalului, prin reducerea vâscozității ei (Reed et al., 2009).



Figura 28. Secreția din pielea de hipopotam ca inspirație pentru produse de protecție solară (Horton, 2021)

Oamenii de știință au descoperit că această secreție mai are și alte efecte benefice pe lângă protecția solară, fiind totodată o substanță antibiotică și având un efect de respingere a insectelor. Cercetătorii încearcă acum să conceapă un produs inspirat de această substanță, care să combine efectul anti-bacterian, anti-insecte și care să ofere protecție solară (SPF).

4.10 Textile inspirate din natură

4.10.1 Banda VELCRO

Banda de fixare VELCRO® (Figura 29) este un exemplu remarcabil de model inspirat din natură. În 1941, inginerul elvețian Georges de Mestral după ce a venit de la o plimbare fiind în munții Alpi, a remarcat că atât pe blana câinelui cât și pe hainele lui din lână sunt prinși numeroși ghimpi sau scaieteți. Încercând să-i de-a jos, el și-a pus întrebarea cum reușesc acești ghimpi să stea așa de bine fixați. Astfel, a descoperit că acest mecanism de fixare poate fi folosit în scop util omului și în 1954 a brevetat invenția în Elveția iar în 1955 brevetul a fost recunoscut și în alte țări precum Statele Unite ale Americii, Germania, Marea Britanie, Suedia, Italia, Olanda, Belgia, Franța și Canada. Denumirea provine de la alipirea cuvintelor din franceză *velours* care înseamnă catifea și *crochet* care înseamnă cârlig de croșetat (o sculă asemănătoare unui ac care la un capăt are formă de cârlig, folosit în procesul de croșetat pentru crearea de haine folosind fire de lână sau alte textile) (<https://www.velcro.com/>).

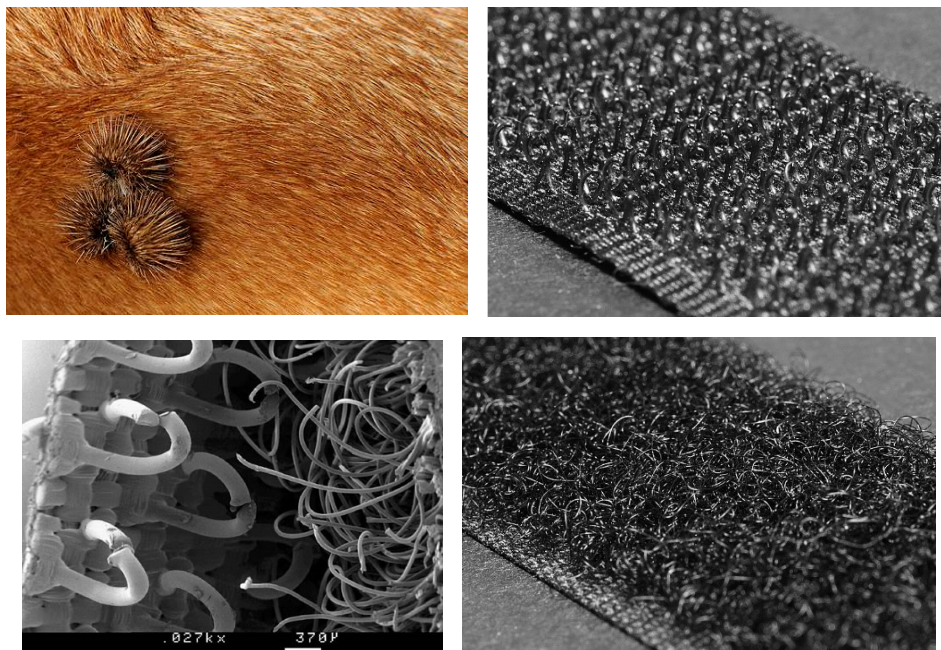


Figura 29. Sistemul de fixare VELCRO® (Bhushan, 2009)

Sistemul de fixare dezvoltat de inginerul de Mestral era alcătuit din două componente adiacente în care una are cârlige mai mari ce se fixează în bucelele celeilalte până când acestea sunt desprinse una de cealaltă. Inițial, acest sistem de fixare a fost realizat din bumbac și nu s-a dovedit a fi foarte eficient, însă benzile de fixare au fost apoi confecționate din materiale plastice precum nailon și poliester. O bandă VELCRO® de 50 mm² este suficient de puternică să ridice o greutate de aproximativ 80 kg (<https://www.velcro.com/>).

La început, sistemul de fixare a fost dedicat în special produselor de îmbrăcăminte. Acesta a câștigat popularitate după ce a fost folosit de NASA în proiectul Apollo (1969) pentru fixarea unor instrumente în interiorul navei sau pe costumul astronauților. În 1968, industria textilă de încălțăminte și îmbrăcăminte începe să adopte utilizarea acestor benzi de fixare pentru a înlocui șireturile, nasturii sau capsele. În 1972 sunt introduse VELCOIN® iar în 1980 benzile ignifuge HI-GARDE® utile în medii cu temperaturi ridicate precum industria petrolului și gazelor, incendii sau medii chimice. În 1988 benzile cu scai au fost folosite în industria auto iar în 1992 în produse de îngrijire personală (fixarea scutecelor la copii) (<https://www.velcro.com/>).

4.10.2 Pielea de rechin

Rechinul este unul din cei mai rapizi pești prădători din mare și poate atinge viteze de peste 72 km/h. Cercetătorii au vrut să vadă ce anume îl face așa de rapid și au descoperit că microstructura pielii îi conferă această abilitate. Din exterior pielea rechinului pare netedă însă ea este de fapt aspră, mai exact, dacă ar fi să o atingem cu mâna, ea este netedă într-un sens și aspră în celălalt sens. Privită la microscop, pielea de rechin prezintă o multitudine solzi microscopici numiți denticuli dermici (Figura 30) care permit apei să curgă "ordonat" prin caneluri (efect Riblet),

reducând astfel rezistența la înaintare sau frecarea cu apa. Cercetările au arătat că la nivelul denticulilor se generează mici vârtejuri ce creează efecte de aspirație care ajută la propulsia rechinului (Bhushan, 2009).

De asemenea, spre deosebire de alte animale marine de dimensiuni mari care trăiesc în ocean, rechinii nu prezintă alge la nivelul pielii ci sunt curați, și asta datorită denticulilor care mai au și rol de autocurățare. Această proprietate poate fi utilă în medicină pentru fabricarea de echipament medical care să nu permită creșterea bacteriilor reducând răspândirea infecțiilor bacteriene. De asemenea, acest concept se poate folosi pentru a acoperi fundul bărcilor pentru a preveni atașarea algelor sau altor organisme lipicioase (Malshe et al., 2018).

Cercetătorii de la compania Speedo s-au inspirat din microstructura pielii de rechin și au creat un costum de înot numit LZR Racer ce este disponibil chiar și în zilele noastre. Costumul "fastskin" a fost purtat de câțiva înotători la Jocurile Olimpice din 2008 de la Beijing, precum Michael Phelps din SUA și Eamon Sullivan din Australia, ediție la care s-au înregistrat noi recorduri mondiale.

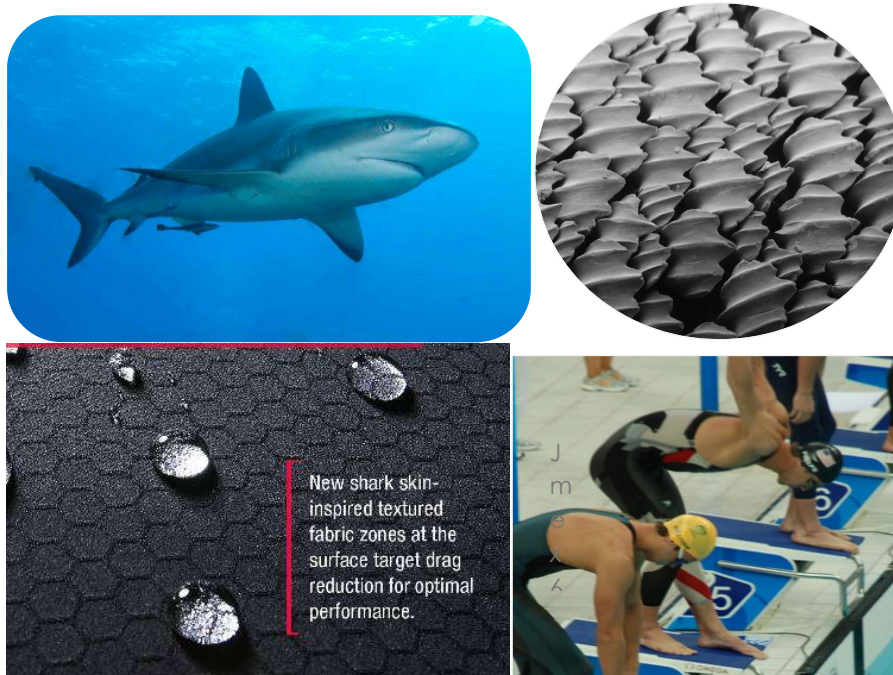


Figura 30. Pielea de rechin – inspirație pentru compania Speedo pentru realizarea unui costum de înot purtat la Jocurile Olimpice din 2008

În prezent există un produs care poartă numele Sharkskin™ (Figura 31) dezvoltat inițial pentru scafandri și mai apoi pentru alte sporturi de apă. Astfel, scafandrii pot să-și păstreze o temperatură normală a corpului în timpul și după scufundări indiferent de temperatura apei sau a mediului.

Produsul este o alternativă la materialele tradiționale precum neoprenul și lycra, și constă dintr-un strat termic principal numit ChillProof confecționat din lână cu fibră goală care absoarbe și reține apa când este scufundat și, de asemenea, previne scurgerea ei prin îmbrăcăminte. Corpul încălzește apa reținută de fibrele de lână asigurând o barieră termică împotriva apei reci de la exterior. Atunci când este

scos la suprafață, stratul ChillProof elimină umezeala și se usucă rapid, fibrele de lână captează aerul care este încălzit de temperatura corpului, menținând un corp uscat.

Al doilea strat tehnic, stratul mijlociu, este 100% rezistent la vânt dar permite aerisirea pentru a regla temperatura corpului oprind în același timp briza rece a vântului. Stratul exterior este un amestec de nailon cu lycra ce oferă rezistență la abraziune și este elastic în 4 direcții. Acest al treilea strat este în plus rezistent la radiații UV pentru protecție împotriva soarelui și impermeabil. Prin urmare, Sharkskin te menține răcoros când este cald și te încălzește când este frig. Acest costum este ideal pentru sporturi nautice ce se desfășoară deasupra apei dar și cele în apă, poate înlocui costumul de neopren tradițional de 3 mm sau poate fi folosit ca strat suplimentar peste acesta pentru a beneficia de un plus de căldură (<https://sharkskin.com/>).

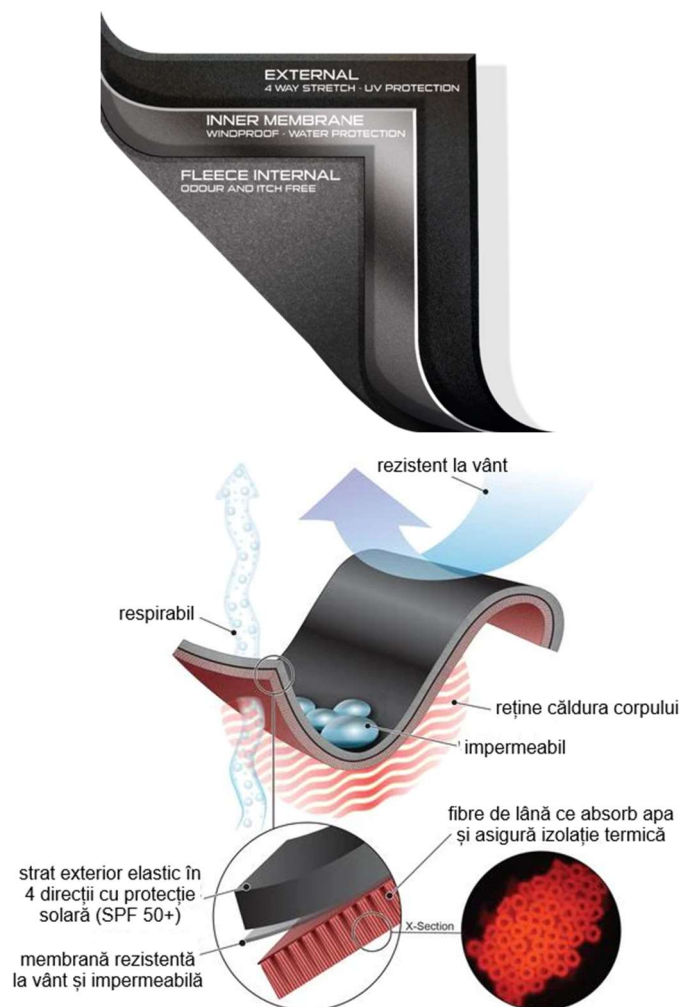


Figura 31. Material Sharkskin (<https://sharkskin.com/>)

Pe lângă produsul standard Sharkskin ChillProof a fost dezvoltat Titanium ChillProof, care are aceeași grosime, este flotabil și anti-vânt, însă vine cu o îmbunătățire în ceea ce privește capacitatea de generare de căldură de la soare prin tehnologia Titanium Far Infrared (TiFIR) încorporată în țesătură. Infra-roșu îndepărtat

(FIR) este cea mai obișnuită modalitate de a genera căldură cu ajutorul soarelui, ca de exemplu atunci când corpul nostru este expus la razele solare ce vor determina creșterea temperaturii corpului (<https://sharkskin.com/>).

Materialul Titanium ChillProof reflectă radiațiile și în același timp le reține pe cele din spectrul Infraroșu îndepărtat generate de corpul nostru care produc căldură și implicit o circulație sanguină mai bună și un metabolism mai eficient. Fără acest strat, căldura generată de corpul nostru prin radiații infraroșii este eliberată în mediul exterior. Testele au arătat că stratul Titanium ChillProof poate asigura o protecție termică echivalentă cu cea a unui costum de neopren cu grosimea de 4,5 sau chiar 5 mm (<https://sharkskin.com/>).

4.11 "Peștele de nisip"

Viețuitoarele care trăiesc în deșert prezintă mecanisme extraordinare de supraviețuire adaptate acelor condiții dure. Un exemplu este șopârta de nisip (*Scincus scincus*) (Figura 32) cunoscută și sub numele de peștele de nisip deoarece se scufundă în nisip și se deplasează pe deasupra prin mișcări ondulatorii asemeni peștilor în apă. De obicei, se scufundă câțiva centimetri în nisip și "înoată" cu viteze de 10 până la 30 cm/s (Baumgartner et al., 2007, 2008).

Pielea șopârlei, la fel ca și la șarpe, este acoperită cu solzi care nu se suprapun și o fac să fie alunecoasă când se deplasează spre înainte, dar îi conferă rezistență mare la mișcarea în direcția opusă. Acest lucru se obține fără lubrifiere, deoarece aceste șopârle nu secretă uleiuri sau alte lichide prin piele. Astfel, s-a constatat că pielea șopârlei de nisip are un coeficient de frecare mai mic decât al oțelului finisat, al sticlei, al politetrafluoretilenei (PTFE) sau al suprafețelor de nailon de înaltă densitate. Mai mult, deși se știe că particulele de nisip sunt abrazive și produc uzare, pielea șopârlei nu prezintă urme de uzare (Ivanović et al., 2018; Baumgartner et al., 2007, 2008).



Figura 32. Șopârta de nisip (Greiner și Schäfer, 2015)

Greiner și Schäfer (2015) de la Institutul de Tehnologie din Karlsruhe (Germania), au folosit gravarea cu laser pentru a crea la scară o suprafață solzoasă pe o placă de oțel. Texturarea s-a realizat cu profilul solzilor îngrămădiți (rânduri de solzi alipite) și distanțați (rânduri de solzi spațiate) (Figura 33-a). Experimentele tribologice s-au realizat în configurația pin-on-disc la o sarcină normală de 2 N și viteza de 0,1 m/s. Pentru condițiile uscate s-a folosit un disc de safir iar pentru

condițiile cu lubrifiere s-a utilizat un disc de oțel (100Cr6), ambele cu o rugozitate de aproximativ $R_a=10$ nm.

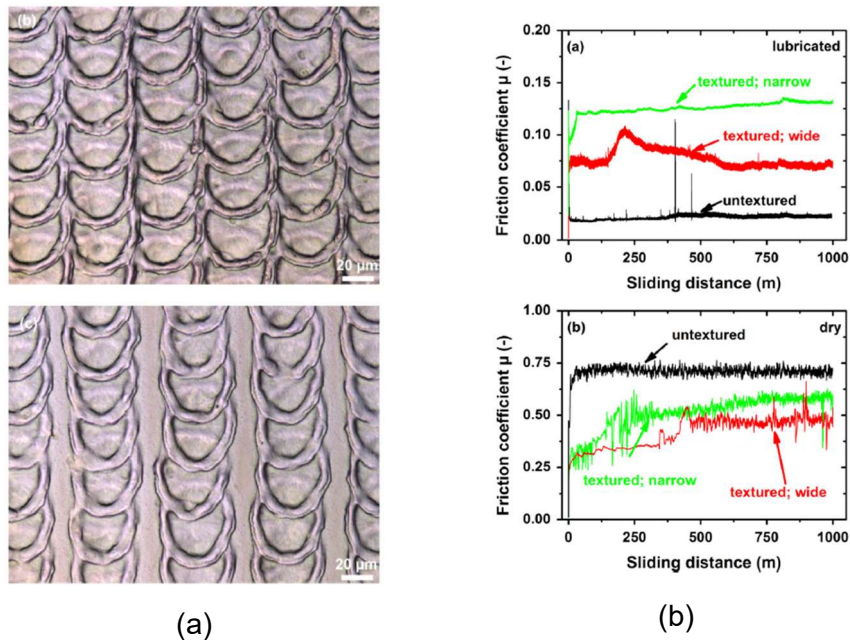


Figura 7. Suprafețe texturate inspirate din pielea reptilelor: (a) imagini ale suprafețelor texturate cu rânduri de solzi unite și spațiate; (b) variația coeficientului de frecare cu distanța de alunecare (Greiner și Schäfer, 2015)

Testele au arătat o reducere cu până la 40% a coeficientului de frecare de alunecare în condiții uscate la suprafețele texturate față de o suprafață fină în timp ce, în condiții de lubrifiere cu un ulei mineral coeficientul de frecare a crescut de aproximativ 3 ori (Figura 33-b).

În opinia cercetătorilor, aceste rezultate pot fi utile în diverse arii tehnologice, precum reducerea frecărilor în sisteme micro și nano-electromecanice care nu pot fi lubrifiate și micro sisteme de poziționare, reducerea frecării în protezele de șold, sisteme care funcționează în vid, la elementele de acționare a hard-diskului sau în senzorii din sistemul de auto-blocare a frânelor la autoturisme (Ivanović et al., 2018).

Compania BASF a dezvoltat textilele electro-conductive (E-Textile) care prezintă un tratament de suprafață cu ioni metalici sau acoperiri oferindu-le proprietăți electrice necesare pentru a fi încălzite sau luminate menținându-și flexibilitatea și manevrabilitatea obișnuită.

Julian Vincent a dezvoltat în 2004 o haină "inteligentă" care se adaptează la modificările de temperatură și umiditate. Mecanismul are la bază un fenomen întâlnit la conurile de pin, deși el este prezent și la alte plante, care își deschid solzii atunci când umiditatea este mai mare, eliminând astfel apa și lăsând aerul să circule, și îi închid atunci când este rece pentru a păstra căldura înăuntru. Țesătura "inteligentă" reacționează la fel atunci când purtătorului îi este cald și transpiră mult sau când este rece.

4.12 Sisteme de adeziune inspirate de la șopârla Geko

Oamenii de știință au fost uimiți de abilitatea șopârlei Geko de a se atașa de diverse suprafețe și de a se deplasa rapid pe acestea fără să cadă sau să alunece, chiar dacă suprafețele sunt la verticală sau șopârla stă cu capul în jos.

Gecko sunt reptile de dimensiune mică, măsurând de la 2,5 cm până la 30,5 cm. Cel mai mare exemplar descoperit măsoară 60 de cm și era originar din Noua Zeelandă iar cel mai mic exemplar numit Geko pitic măsoară 1,6 cm. Există aproximativ 1500 de specii de șopârle Geko ce se regăsesc peste tot în lume, în zonele calde. Mediul natural poate include: păduri, deșerturi, insule tropicale. Sunt animale insectivore, care în multe locuri din lume conviețuiesc în pace cu oamenii. Deoarece nu sunt agresive în mod natural cu omul, acestea sunt acceptate în locuințe deoarece se hrănesc cu insectele care se strâng la lumina becului noaptea sau ca animale de companie.

Mecanismul care le permite șopârlelor Geko să se lipească și apoi să se desprindă de suprafețe nu este pe deplin înțeles însă se crede că se datorează unor pliuri acoperite cu niște perișori fini înclinați ("setă") de la nivelul tălpilor care funcționează ca niște ventuze. Fiecare mm^2 conține aproximativ 14000 de perișori ce au diametrul de aproximativ $5 \mu\text{m}$ și care la vârf sunt divizați în 100 până la 1000 de perișori și mai fini ("spatule"), de ordinul nanometrilor (Figura 34) (Bhushan, 2009; Li Y. et al., 2016).

La nivelul acestor formațiuni din cheratină se dezvoltă forțe de atracție van der Waals și forțe de capilaritate ce determină atașarea fermă pe suprafețe fără o aplicare a unei presiuni normale la suprafață ci mai degrabă datorită tensiunilor tangențiale, de forfecare (Figura 35). Totuși, Izadi et al. (2014) au raportat că fenomenul de aderență se datorează forțelor electrostatice de la nivelul contactului cu suprafețele. Aceste pliuri de la nivelul picioarelor se curăță foarte ușor atunci când există murdărie. Suprafața pe care șopârla Geko nu se poate fixa la fel ca pe celelalte este politetrafluoretilena (PTFE).

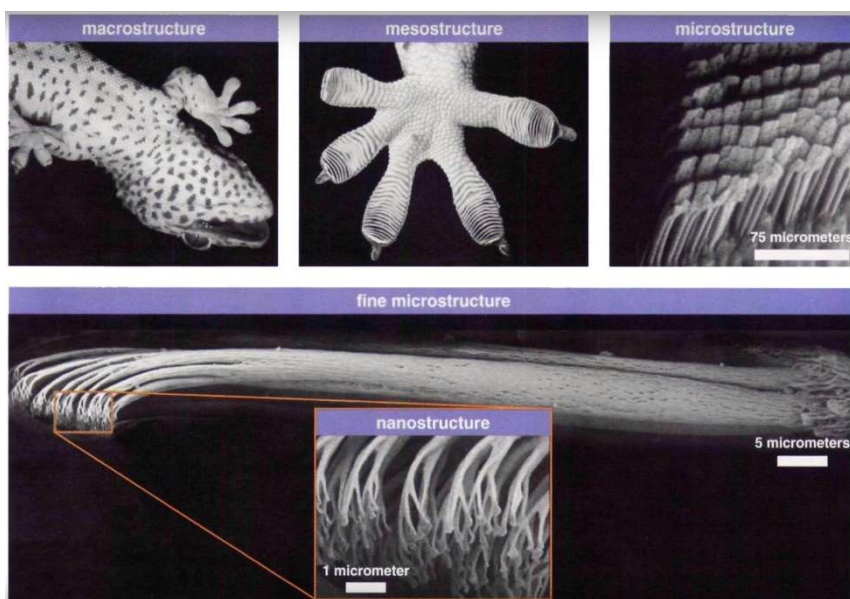


Figura 34. Imagine la microscop care prezintă structura morfologică a picioarelor șopârlei Gecko (Li Y. et al., 2016)

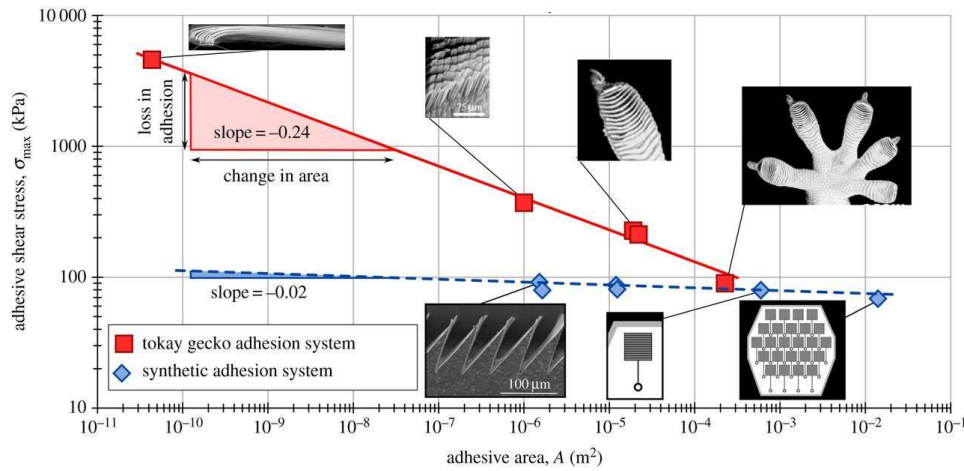


Figura 35. Variația tensiunii de forfecare cu suprafața de adeziune (Hawkes et al., 2015)

Șopârlele Gecko își regenerează pielea la anumite intervale regulate de timp în funcție de specie și acest proces este influențat de umiditate (Puthoff et al., 2010; Prowse et al., 2011; Tao et al., 2015). Aderența șopârlei Gecko este mai consistentă atunci când umiditatea este crescută dar este puternic redusă atunci când este scufundată în apă. Rolul apei în mecanismul de aderență este încă în discuție, însă anumite experimente au arătat că interpunerea de molecule de apă între pliuri și suprafață cresc energia de suprafață ceea ce duce la o forță de aderență crescută (Huber et al., 2005; Chen și Gao, 2010; Puthoff et al., 2010; Prowse et al., 2011; Loskill et al., 2012). Atunci când se desprind de suprafață, șopârta gecko face o hiperextensie a degetelor dezlipindu-și mai întâi vârful și apoi progresiv pliu cu pliu, ca un peeling, la fel cum se dezlipește o bandă adezivă de o suprafață (Figura 36).

Perii unui Gecko matur ce cântărește 70 grame ar fi capabili să susțină o greutate de aproximativ 133 kg, fiecare spatulă exercitând o forță de adeziune de 5 până la 25 nN. Valoarea exactă a forței de aderență variază în funcție de energia de suprafață a substratului la care aderă (Huber et al., 2005; Lee et al., 2007).

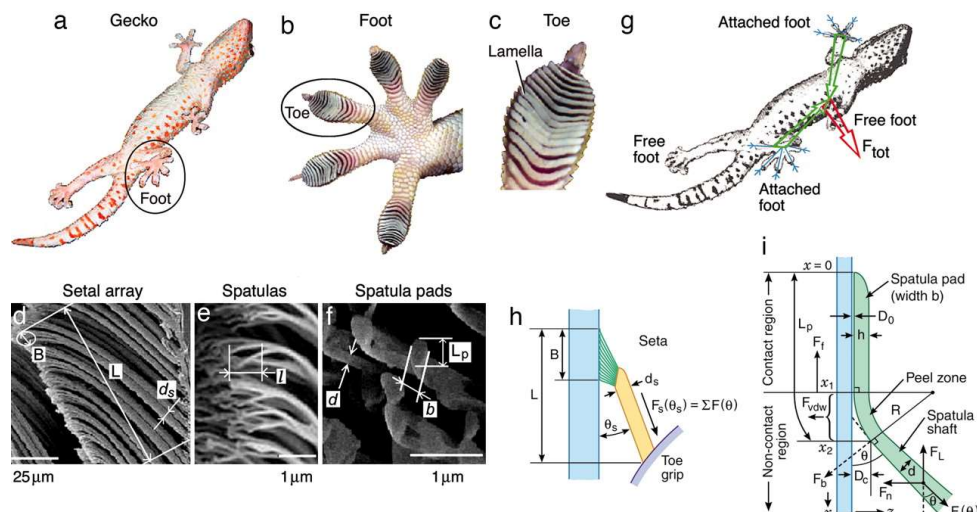


Figura 36. Ilustrarea schematică a procesului de adeziune a picioarelor șopârlei Gecko (Li Y. et al., 2016)

Pe lângă spatule, în procesul de adeziune intervin și fosfolipide, o substanță produsă în mod natural de corpul șopârlei Gecko. Aceste lipide permit lubrifierea spatulelor ceea ce dă posibilitatea desprinderii piciorului pentru a face pasul următor (Hsu et al., 2011).

Pielea de pe corpul șopârlelor Gecko nu este acoperită de solzi ci de protuberanțe de ordinul micronilor care oferă superhidrofobicitate și acțiune antimicrobiană (Green et al., 2017; Watson et al., 2015).

Inspirați de mecanismul de aderență/adeziune a șopârlei Gecko, oamenii de știință au dezvoltat adezivi sintetici din polimeri, precum poliamide (PA), polipropileni (PP), polidimetilsiloxani (PDMS) (Li Y. et al., 2016; Li Q., 2017) sau pe bază de nanotuburi de carbon (CNT). Realizarea pliurilor s-a realizat folosind tehnologii de fabricație specifice sistemelor microelectromecanice (MEMS). Astăzi există un produs numit Gecko Tape, o bandă adezivă utilizată în diverse domenii precum robotică, medicină, sport, domeniul militar. Un centimetru pătrat de bandă adezivă poate susține o greutate de aproximativ 1 kg.

Cercetătorii de la Universitatea Stanford au dezvoltat robotul Stickybot care este capabil să adere de sticlă și să o curățe (Figura 37). De asemenea, alți doi roboți inspirați de șopârlea Gecko, Geckobot și Waalbot, dezvoltați de o echipă de cercetători de la Universitatea Carnegie-Mellon din Pennsylvania au fost realizați pentru a se cățăra pe suprafețe verticale.



Figura 37. Robotul Stickybot (Li Y. et al., 2016)

În preocupările cercetătorilor există și varianta de a dezvolta produse sub formă de mănuși cu care omul ar putea escalada pe suprafețe lucioase verticale, așa cum este ilustrat schematic în figura 38 (Hawkes et al., 2015)

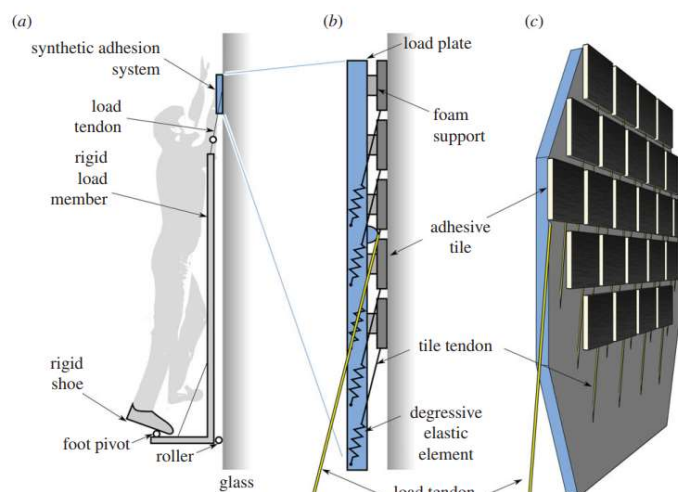


Figura 38. Sistem de aderență pentru escaladarea pereților verticali (Hawkes et al., 2015)

4.13 Adeziv inspirat de la midii

Până de curând, majoritatea substanțelor și materialelor folosite în producție erau analizate doar din perspectiva costului și a performanței, impactul asupra mediului înconjurător nefiind luat în calcul. Elizabeth Grossman scria în cartea "Chasing Molecules: Poisonous Products, Human Health and the Promise of Green Chemistry" că „doar 4% dintre cele 30.000 de chimicale folosite în acest moment în produse sunt monitorizate în mod constant pentru a li se evalua impactul de mediu și asupra sănătății umane, iar peste 75% dintre acestea nu au fost evaluate niciodată,,

Astfel se explică o serie de probleme de mediu și de sănătate apărute în ultimele zeci de ani, de la folosirea azbestului în pereții clădirilor, a vopselelor pe

bază de plumb în case și scoli sau a bisfenolului A în sticlele de plastic și în biberoanele destinate bebelușilor.

Astăzi, companiile încearcă o schimbare, luând în calcul impactul asupra sănătății umane și a mediului încă din faza de producție. Pentru produse prietenoase cu mediul, inventatorii se inspiră din natură. Un exemplu este oferit de Kaichang Li, cercetător la Universitatea din Oregon. Acesta a inventat Purebond, un adeziv din soia, conceput pentru a înlocui la lipirea placajelor substanțele adezive pe bază de formaldehidă, o substanță cancerigenă. Omul de știință a reușit să conceapă prin imitarea naturii acest adeziv ce nu are efecte secundare asupra sănătății umane. Astfel, el a studiat și copiat metoda prin care funcționează proteinele lichide ("byssi") folosite de midii pentru a se atașa de stânci (Figura 39). Pe lângă faptul că nu are niciun efect secundar asupra sănătății umane, PureBond este și mai ieftin de produs decât adezivul comercial.

Amprenta de adeziv pe care o formează midii pentru a se atașa de stânci poate suporta greutatea de aproximativ 12,5 kg. Structura adezivului este compusă din fibre de collagen reticulate și o proteină cunoscută sub numele de Mefp-1, care este mai durabilă decât orice altă fibră.

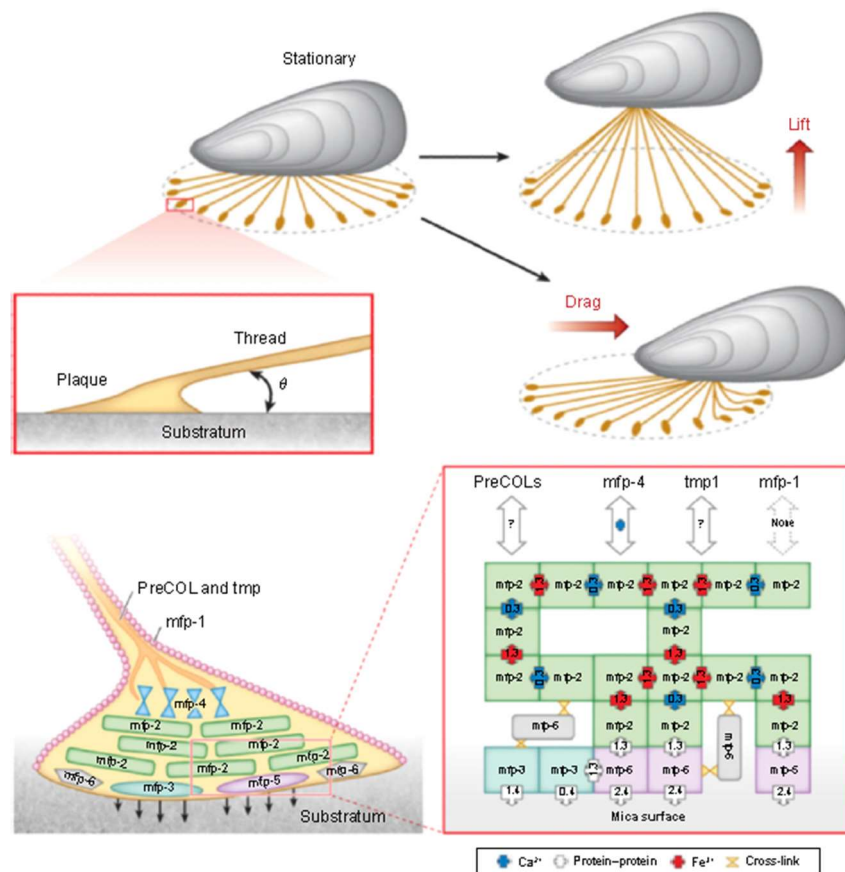


Figura 39. Sistemul de adeziune al midiilor (Hwang et al., 2015)

4.14 Pânza de păianjen

Toți păianjenii și unele specii de miriapode și insecte, utilizează mătasea în mai multe scopuri, cum ar fi capturarea prăzii, construirea habitatului sau chiar protejarea ouălor (Viney, 2000). De obicei, organismul care beneficiază de pe urma folosirii mătăsii este și producătorul ei (Figura 40), însă o excepție interesantă sunt furnicile țesătoare adulte care folosesc mătasea larvei ca o componentă structurală a cuibului (Dorow et al., 1990).



Figura 40. Mătase naturală: (a) Pânză de păianjen; (b) viermi de mătase

Ca structură, pânza de păianjen (Figura 41) este o înșiruire de unități proteice ce prezintă legături de hidrogen. Structura moleculară a proteinelor și modul de aranjare a secvențelor au o influență directă asupra proprietăților mecanice ale pânzei (Keten și Buehler, 2010; Cranford et al., 2014; Ebrahimi et al., 2015; Arndt et al., 2022; Lu W. et al., 2023)

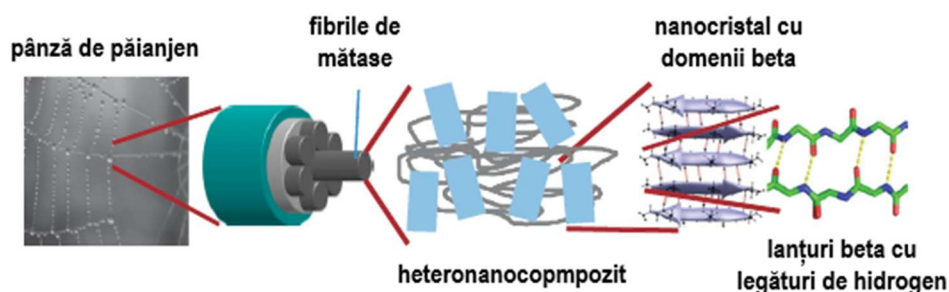


Figura 41. Structura ierarhică a pânzei de păianjen (Keten și Buehler, 2010)

În urma unor teste de rezistență a firelor de mătase naturale s-a observat că aceasta posedă proprietăți mecanice extraordinare raportate la dimensiunile ei

(Cranford et al., 2014). Totuși, dacă ar fi să utilizăm mătasea în elemente de construcție, aceasta ar trebui să suporte sarcini mari pe durate mari de timp, însă firele de mătase sunt supuse la sarcini pe perioade scurte de timp. Mătasea de păianjen este predispusă la supracontractare în apă (Work, 1981), suferă detensionare (Bell et al., 2002) și prezintă fluaj semnificativ (capacitate scăzută de a suporta sarcini pe termen lung) (Smith et al., 2003), toate acestea fiind accentuate de umiditate (Viney și Bell, 2004; Ritchie et al., 2005; Qin și Buehler, 2013; Gronau et al., 2013; Ebrahimi et al., 2015). Și mătasea coconului viermilor de mătase este predispusă la fluaj și detensionare (Morrison et al., 2004), deși umiditatea nu afectează așa drastic aceste răspunsuri în timp precum pânza de păianjen. Proprietățile la tracțiune a celor două tipuri de mătase sunt slab reproductibile, ceea ce le face nepotrivite în aplicații în care este necesară o predicție exactă a cedării sau distrugerii (Pérez-Rigueiro et al., 1998, 2001).

Deși studiul proprietăților mecanice ale plasei de păianjen s-a axat mai mult pe testarea fibrelor individuale solicitate la tracțiune, caracterizarea ar trebui, totuși, făcută pe ansamblul unei plase. Geometria plasei de păianjen poate avea forme diferite iar în cadrul lor se pot deosebi fire cu diferite grosimi distribuite fie radial, fie concentric față de centrul plasei, dar și joncțiuni dintre fibre sau zona de ancorare a plasei pe suportul natural al mediului înconjurător (Qin și Buehler, 2013).

Unii cercetători (Koski et al., 2013) au raportat utilizarea unei metode nedistructive ce folosește difuzia Brillouin care pune în evidență tensorii de rigiditate, din care poate fi determinat răspunsul elastic al materialului la forțele aplicate. Difuzia Brillouin folosește refracția luminii laser pentru a măsura viteza de propagare a undelor elastice într-un material, determinând astfel rigiditatea.

Koski et al. (2013) au determinat distribuția tensorului rigiditate pe zona unei plase atunci când aceasta este supracontractată, adică este expusă la umiditate. Rezultatele ar putea ajuta la prezicerea răspunsului mecanic al pânzei atunci când este încărcată de forța gravitațională a picăturilor de rouă, evidențiind modificările de rigiditate și efectele asupra transmiterii vibrațiilor.

Transmiterea vibrațiilor de-a lungul firelor este deosebit de importantă pentru păianjen deoarece acesta are o vedere slabă și se bazează pe vibrațiile produse de prada prinsă în plasă. Prezența picăturilor de apă duce la deformarea pânzei datorită forței gravitaționale (Figura 42), dar duce și la supracontractie care crește rigiditatea cu firelor cu peste 40% (Qin și Buehler, 2013).

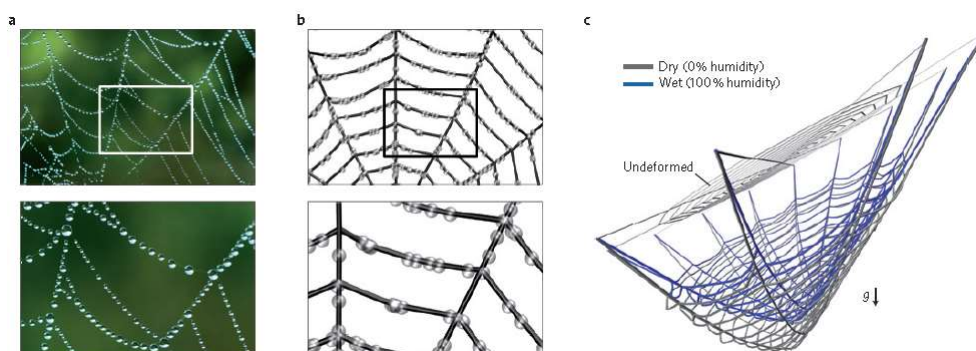


Figura 42. Comportarea pânzei de păianjen la umiditate: (a) imaginea unei

pânze de păianjen încărcată cu picături de rouă; (b) model de deformare a pânzei sub acțiunea picăturilor de rouă; (c) pânză deformată în stare uscată și umedă (Qin și Buehler, 2013)

Folosind datele măsurate și comparând cu pânze alcătuite din mătase uscată și umedă, ambele expuse la aceeași încărcare gravitațională, se poate observa că rigiditatea mai mare a pânzei umede reduce deformația (săgeata pe direcția gravitației este redusă cu aproape 17%). În plus, comparând amplitudinea și durata vibrației transmisă de la periferia pânzei (unde ar putea fi o pradă) către centru, înainte și după expunerea la umiditate, se observă că semnalele au o frecvență mai mare de vibrație după expunere. Mai mult, timpul de transfer este scurtat cu mai mult de 22% în condiții umede, în timp ce amplitudinea vibrației în centru rămâne la un nivel similar. În concluzie, prezența umezelii nu numai că face pânza mai rigidă dar poate ajuta păianjenul să localizeze mai ușor prada (Qin și Buehler, 2013).

Din punct de vedere istoric, mătasea produsă de viermii de mătase a fost folosită pentru producerea de obiecte vestimentare. Astăzi, mătasea și materiale derivate din aceasta pot fi întâlnite chiar în medicină ca fire pentru suturi sau plasă chirurgicală (Ebrahimi et al., 2015).

Un mod obișnuit de a produce mătase este creșterea viermilor de mătase. Mătasea produsă de viermii de mătase este una moale, folosită pentru construirea coconilor, bile de bumbac, necesari pentru transformarea lor în molii.

Cercetătorii de la Massachusetts Institute of Technology (MIT) și Politecnico di Torino din Italia au publicat un studiu în care au studiat modul cum răspunde la solicitările mecanice pânza de păianjen. Studiul cuprinde simulări complexe pe calculator și rezultate experimentale care arată că durabilitatea pânzei de păianjen depinde de rezistența mătăsii și de modelul de ansamblu al pânzei care compensează solicitările variabile și ruperea (Ebrahimi et al., 2015).

În ciuda limitărilor arătate de mătase, cercetătorii au continuat să producă fire de mătase sau materiale sintetice asemănătoare (Vendrey și Scheibel, 2007; Ebrahimi et al., 2015; Arndt et al., 2022). O caracteristică a mătăsii naturale care a persistat în urma biomimetismului este aceea că fibrele de mătase sunt filate din soluție apoasă în material insolubil în apă, însoțite de modificări ale stării fizice (conformație), dar nu și natura chimică a proteinei. Acest model ce adoptă o procesare ecologică se bazează pe capacitatea moleculelor proteice globulare de mătase solubile în apă de a agrega într-un cristal lichid care este fluid și permite curgerea, favorizând astfel alungirea moleculelor și formarea locală a domeniilor cristaline insolubile în apă (Viney, 1997).

În mod similar, prelucrarea artificială a soluțiilor apoase de fibrină a viermilor de mătase (Figura 43) a condus la materiale care imită proprietățile mătăsii naturale (Jin și Kaplan, 2003; Ebrahimi et al., 2015; Ling S. et al., 2017). Procesarea apoasă a fost utilizată pentru a produce prototipuri de lentile de mătase și rețele de difracție din soluții de fibrină de mătase; transparența lor a fost realizată prin controlul cristalizării straturilor β , produsele beneficiind de proprietățile mecanice și de biodegradabilitatea mătăsii (Lawrence et al., 2008).

Înglobarea unor componente active (cum ar fi enzime) în rețelele de mătase poate duce la multe funcționalizări ale mătăsii ca substrat, creând suprafețe bioactive cu o multitudine de aplicații biologice posibile, cum ar fi folosirea mătăsii ca schelet pentru a cultiva țesuturi precum osul (Sofia et al., 2001; Solar și Buehler, 2012). Deoarece mătasea este biodegradabilă, utilizarea acesteia ca o "schelă" celulară și tisulară ar putea fi ideală pentru un material care să nu necesite îndepărtare ulterioară. Biodegradabilitatea "schelelor" cu fibroină de mătase a fost testată (Wang Y. et al., 2008), timpii de degradare fiind controlați de mediile de procesare. Biodegradabilitatea face ca mătasea să fie potrivită ca precursor pentru medicamente cu eliberare controlată (Hardy et al., 2008). Prin urmare, deși imitarea mătăsii a avut ca scop copierea proprietăților mecanice ale acesteia, cercetătorii au găsit utile mai ales procesul de fabricare a materialelor (Reed et al., 2009).

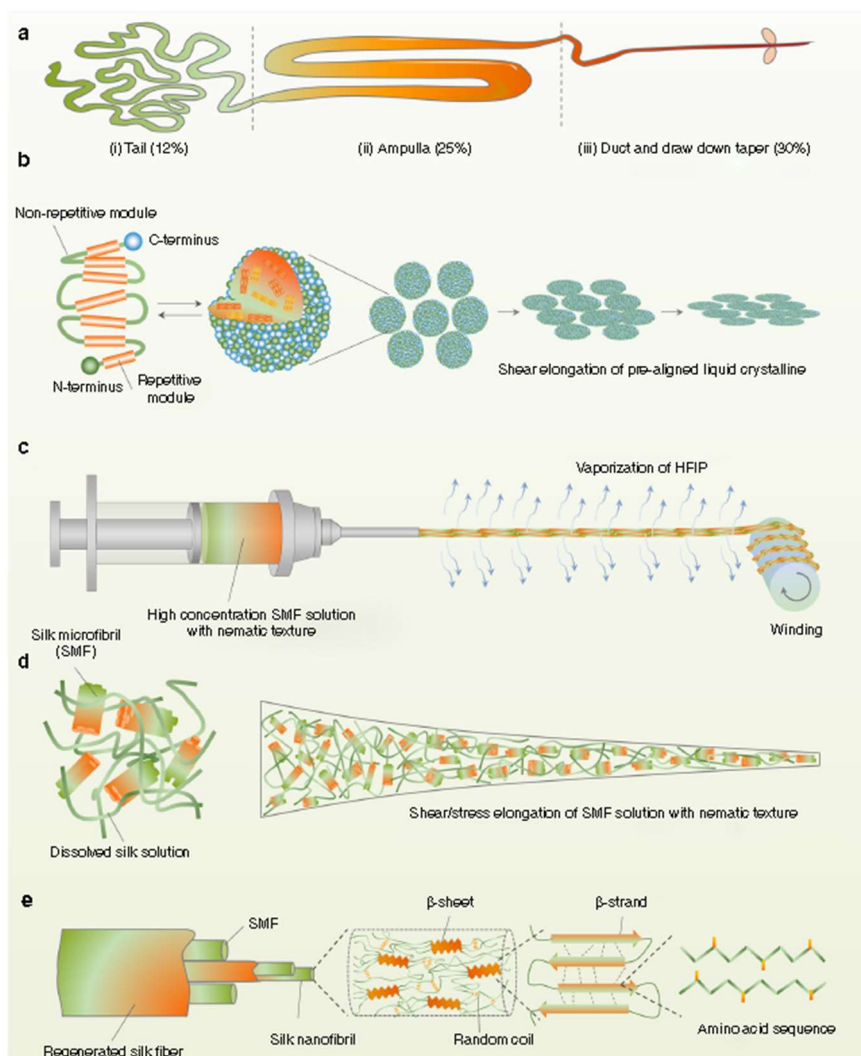


Figura 43. Procesul natural și artificial derulare: (a) ilustrarea celor trei etape de obținere a fibrei de mătase din glanda viermilor de mătase; (b) ilustrare schematică a mecanismului de asamblare a fibrelor de mătase naturală care apare pe parcursul procesului de rulare; (c) ilustrarea procesului sintetic; (d) evoluția microfibrilelor de mătase pe parcursul procesului de rulare (Ling S. et al., 2017)

Cercetătorii de la Universitatea Tianjin (Wang J. et al., 2022) au descoperit o mătase cu 70% mai rezistentă decât pânza de păianjen (Figura 44) prin eliminarea unui strat lipicios extern și filarea manuală a mătăsii.

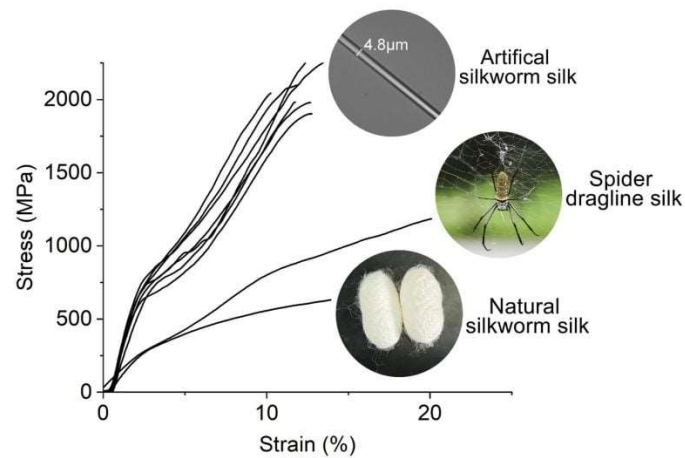


Figura 44. Curba tensiune-deformație specifică a mătăsii naturale și artificiale (Wang J. et al., 2022)

4.15 Anvelope bionice

Anvelopele reprezintă elementele care fac ca mașina să vină în contact cu solul și îndeplinesc mai multe roluri simultan, cum ar fi: rezistență scăzută la rostogolire în mers pentru a reduce consumul de combustibil, rezistență mare la alunecare în timpul frânării pentru a micșora distanța de frânare și trebuie să fie durabile și să ruleze silențios.

Oamenii de știință au găsit rezolvare la aceste probleme privind în natură. Modelul natural a fost ghepardul, care se știe că este un prădător carnivor foarte rapid ce atinge o viteză mare (până la 100 km/h sau chiar mai mult) într-un timp scurt. Corpul său a evoluat pentru viteză dezvoltând picioare lungi, corp și coadă alungite. În timpul alergării, labele ghepardului sunt mai înguste pentru a minimiza frecarea cu solul și a economisi energie, însă atunci când încetinește sau își schimbă brusc direcția de alergare, labele se desfac mărirind suprafața de contact cu pământul și asigurând astfel o stabilitate mai mare (Figura 45). Prin urmare, labele de ghepard sunt optimizate pentru accelerare rapidă, alergare eficientă în linie dreaptă, stabilitate în viraje și eficiență la frânare (Ivanović et al., 2018).



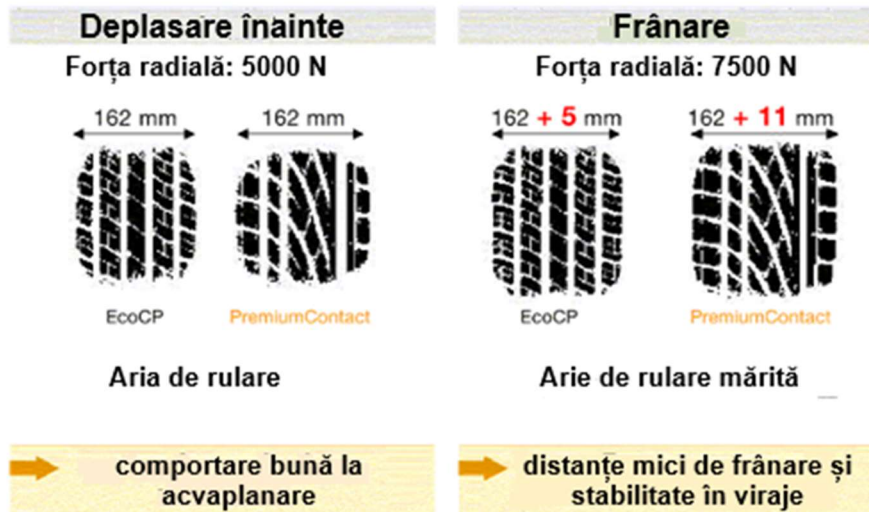


Figura 45. Anvelope bionice inspirate din labele ghepardului (Plant Biomechanics Group Freiburg, 2013)

Cercetările au fost transferate în structura anvelopelor de vară ContiPremiumContact™, produse de compania Continental Automotive. În timpul mersului, anvelopa este la fel de lată ca o anvelopă normală de vară. Pe lângă consumul redus de combustibil ea se comportă bine și la acvaplănare. La frânare, inerția este transferată punții față a mașinii iar anvelopele bionice preiau forța de frânare și se deformează mai mult decât o anvelopă normală, distanța de frânare fiind scurtată cu aproximativ 10%. De asemenea, anvelopa bionică prezintă un comportament bun în viraje. Strategia folosită pentru dezvoltarea acestui produs bionic a fost de a găsi compoziția optimă de cauciuc și cea mai bună structură posibilă (Plant Biomechanics Group Freiburg, 2013; Ivanović et al., 2018).

Dacă ghepardul a reprezentat inspirația pentru anvelopele de vară pentru condiții uscate, anvelopele pentru condiții umede de rulare au fost inspirate din structura tălpilor unor specii de broaște, cum sunt broasca de copac (Figura 46-a) și broasca de apă dulce (Figura 46-b) care posedă abilități de a se cățăra chiar și pe suprafețe umede (Barnes, 1999, 2013, 2015; Kappl et al., 2016; Persson, 2007; Iturri, 2015). Privite la microscopul electronic, degetele broaștelor prezintă un mozaic de pernuțe ce conțin celule epiteliale cu formă aproximativ hexagonală (Figura 46-c, d și e) care le oferă aderență în timp ce se urcă pe copac sau pe stâncile umede. Printre aceste celule sunt dispersați porii glandelor mucoase care produc o secreție apoasă ce ajută la mecanismul de adeziune de la nivelul fiecărui deget. Mecanismul de aderență a fost asemănat cu lipirea șervețelelor de hârtie umezite de sticlă. S-a observat formarea unui menisc în zona de contact dintre degetul broaștei și substrat, cu prezență de fluid, ceva specific adeziunii fluide față de adeziunea uscată. Broaștele aderă mai bine pe suprafețele umede decât pe cele aspre și rezistă mai bine la forțe de forfecare rapide decât la cele lente, ceea ce este de așteptat la orice sistem care folosește adeziunea umedă (Bhushan, 2009)., datorită proprietăților vâsco-elastice ale fluidului. Pe suprafețe de sticlă verticale, picioarele alunecă astfel

încât broasca și le desprinde și apoi le fixează pentru a menține aderența (Barnes, 1999, 2013, 2015). Modelul în V al anvelopei din figura ..(f) oferă o evacuare rapidă a apei din zona de contact, reducând astfel riscul de acvaplănare (Persson, 2007; Iturri, 2015).

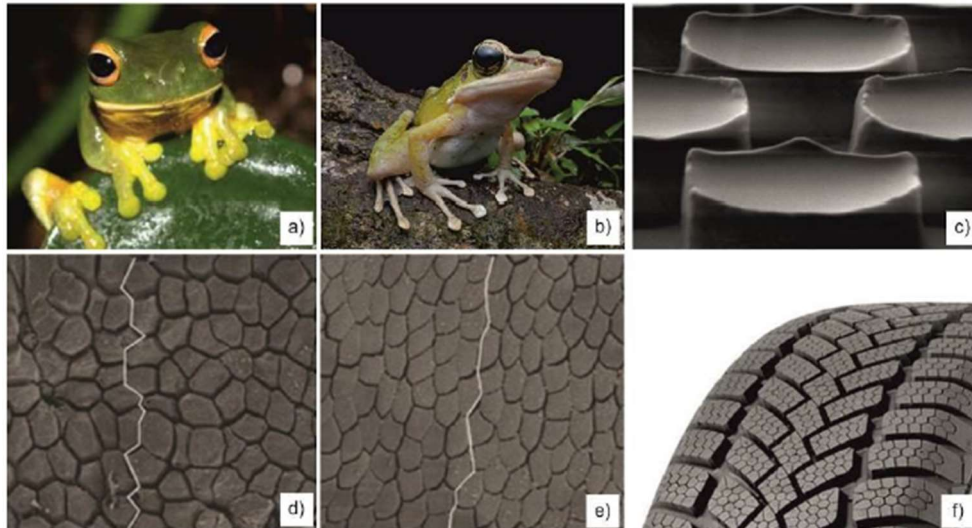


Figura 46. Anvelope bionice inspirate din degetele broaștelor: (a) broasca de copac; (b) broasca de apă dulce; (c) imagine la microscop a pernuțelor de pe degete; (d) și (e) imagine la microscop a celulelor epiteliale; (f) produs biomimetic: anvelopa de iarnă ContiWinterContact™ TS780 (Ivanović et al., 2018)

4.16 Bionica în arhitectură

Arhitecții au fost dintotdeauna fascinați de formele și modelele din natură. Multe dintre acestea s-au dovedit a fi utile în dezvoltarea de construcții și structuri rezistente, însă altele pot fi preluate doar pentru înfățișarea estetică (obiecte decorative, mobilă, arhitectură urbană ș.a.). În figura 47 sunt ilustrate câteva idei de obiecte decorative de tip tapet pe perete sau obiecte de mobilier inspirate din natură. Unele dintre obiectele de mobilier sunt din lemn iar altele sunt realizate prin tehnologia aditivă de imprimare 3D.



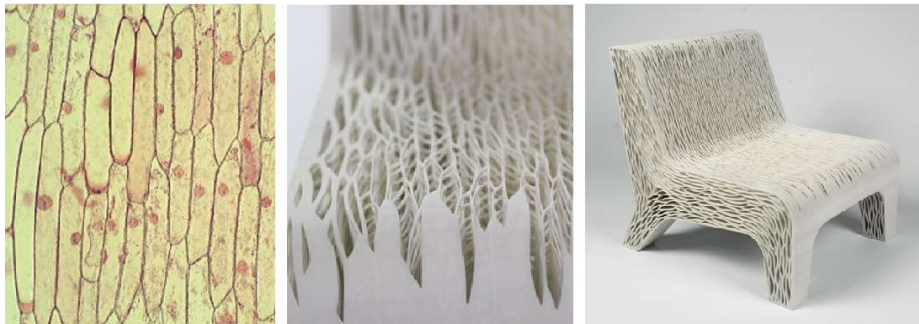
(a)



(b)



(c)



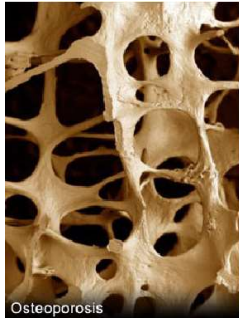
(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)

Figura 47. Obiecte decorative bionice inspirate din forme naturale: (a) tapet inspirat din penele din coada de fazan; (b) bancă din lemn inspirată din crengile de copac; (c) rafturi decorative inspirate din forma hexagonală a fagurelui de miere; (d) scaun inspirat din structura celulelor vegetale, realizat prin imprimare 3D (creat de Lilian van Daal); (e) fotoliu inspirat din petalele florii de Lotus (creat de Albina Basharova); (f) masă inspirată din forma picioarelor insectei *Mantis Religiosa* (Călugăriță); (g) "scaunul os" inspirat din structura osului (creat de Joris Laarman); (h)

*scaunul "Quarț" cu aspect de cristaloid (creat de Davide Barzaghi); (i)
masă inspirată din forma unui arbore (creat de Scott Cawood) (Tavsan și
Sonmez, 2015)*

Bionica are implicații din ce în ce mai pregnante și în arhitectura urbană care aduce natura mai aproape, în zone din orașe aglomerate precum parcuri, campusuri, zone comerciale, clădiri de birouri ș.a. (Jović și Mitić, 2020).

Arhitectul Antoni Gaudi spunea: "Dacă natura este creația lui Dumnezeu, iar în natură se regăsesc o multitudine de forme arhitecturale, atunci cea mai bună cale de a-l venera pe Dumnezeu este să construiești monumente folosindu-i însăși creația". Gaudi a proiectat construcția bisericii Sagrada Familia din Barcelona în 1882 (Figura 48), folosind modele geometrice pe care le-a observat în natură, în special forme regulate precum paraboloid hiperbolic, hiperboloid, elicoid și con. Pentru interior a folosit modele inspirate din structura internă a paiului de stuf, papură sau chiar a osului. Aceste forme și structuri s-au dovedit a fi atât funcționale și rezistente dar și estetice, Gaudi reușind să transpună într-un mod remarcabil limbajul naturii în arhitectură (Soyeon et al., 2016; Liu and Chen, 2015; Salas et al., 2018).



Figura 48. Biserica Sagrada Familia, Barcelona

Un alt monument dedicat naturii este teatrul Esplanade din Singapore realizat de Michael Wilford și arhitecții DP care are o înfățișare spectaculoasă ce imită fructul

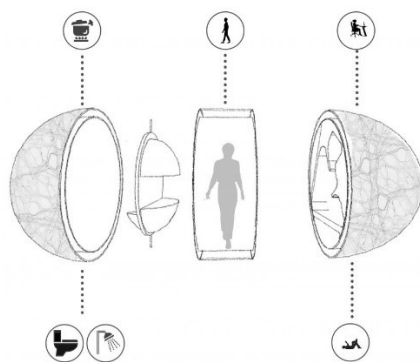
durian (Figura 49). Acest fruct are coaja plină cu spini pentru a proteja semințele din interior și prin similitudine clădirea protejează vizitatorii de razele soarelui. Pe pereții din sticlă sunt acoperiți cu niște lambriuri triunghiulare de aluminiu care umbresc clădirea și permit adaptarea lor la poziția și direcția soarelui.



Figura 49. Teatrul Esplanade din Singapore

O echipă de arhitecți polonezi de la Universitatea de Tehnologie Wrocław formată din Karolina Kosmowska, Beniamin Walecki și Anna Wojtynia, au proiectat o capsulă biomimetică mobilă cu care au câștigat competiția internațională "Nomad" organizată de platforma UNI. Proiectul lor denumit "Adaptive Cell" reprezintă o locuință de supraviețuire cu aspect futurist inspirată din structura unei celule vegetale cu elemente de design inspirate din pânza de păianjen și carapacea gândacilor.

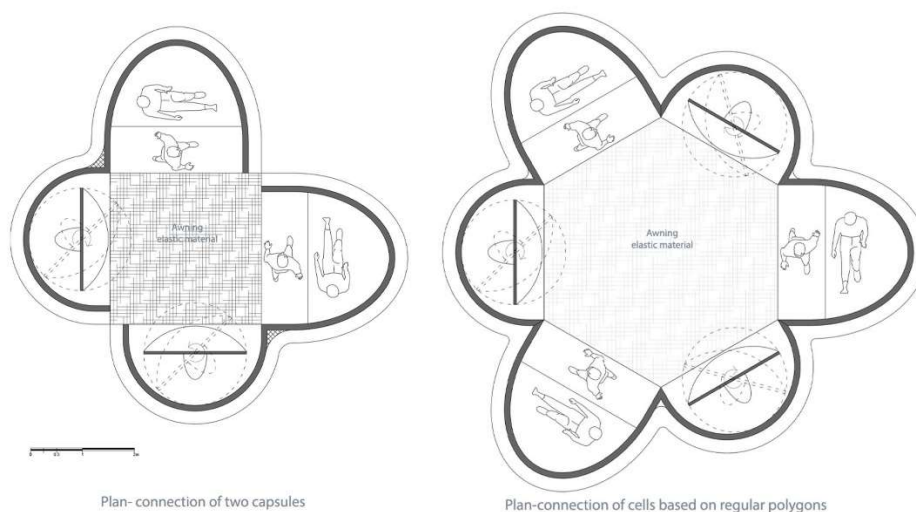
Provocarea competiției a fost proiectarea unei unități de locuit mobilă cu aspect futurist pentru nomazii moderni. Structura trebuia realizată din materiale ușoare care să facă capsula ușor de transportat, iar în interiorul ei să existe elemente esențiale supraviețuirii (Figura 50-a). Un aspect important a fost optimizarea unității pentru supraviețuirea în diferite condiții meteorologice și climatice (Figura 50-b). Suprafața maximă admisă trebuia să fie de 10 m². "Designul capsulei noastre mobile este în primul rând un răspuns la problemele apărute în pandemie. Nevoie de învățare sau de lucru de la distanță au deschis orizonturile unui stil de viață complet nou. În cadrul competiției internaționale UNI, am proiectat o unitate de locuit mobilă cu aspect futurist, capabilă să se miște și să se adapteze atât utilizatorului cât și condițiilor climatice", au explicat autorii (Bies, 2022).



(a)



(b)



(c)

Figura 50. Capsulă mobilă de supraviețuire care a fost proiectată folosind elemente bionice (Bies, 2022)

Conceptul arhitectural combină ideea de casă ca adăpost și mijloc de transport. Potrivit autorilor, proiectul este destinat să asigure adăpost unei singure persoane, care în funcție de nevoile sale, va își va putea interconecta capsula cu alte capsule (Figura 50-c). Capsula se va putea deplasa datorită soluțiilor futuriste ce îi vor permite să fie transportată prin aer, pe uscat sau pe apă, iar materialele speciale din care este construită îi vor asigura rezistența și etanșeitarea în diverse condiții. Alimentarea cu energie a capsulei a fost inspirată tot din natură, de la alge. După cum se știe, algele colectează energia din radiația solară mult mai eficient decât panourile fotovoltaice, iar materia este folosită ca biocombustibil pentru

alimentarea capsulei. Algele cresc într-un ritm rapid mărindu-și volumul într-o zi de câteva ori, asta face ca materia să fie de folos pentru alimentarea unei unități independente. Materialele de construcție din interior au fost inspirate din pânza de păianjen care prezintă rezistență foarte bună și în același timp este și ușoară. De asemenea, arhitecții au echipat capsula cu un strat bionic asemănător carapacei gândacului *Stenocara gracilipes* care își procură apa din umiditatea atmosferică. Mai mult, acest strat va fi capabil să regleze și fluxul de lumină (Bies, 2022).

4.17 Sisteme de detecție și de reflexie

4.17.1 "Ochi de pisică"

Reflectoarele "ochi de pisică" folosite ca elemente de semnalizare pe mijlocul sau pe marginea străzilor, au fost inventate de Percy Shaw în 1935 după ce a studiat mecanismul de vedere la pisici (Figura 51). El a descoperit că pisicile au un sistem de celule reflectorizante, cunoscut sub numele de *tapetum lucidum*, care era capabil să reflecte și cea mai mică cantitate de lumină. Astfel de elemente reflectorizante plasate la nivelul străzii permit șoferilor care circulă pe timpul nopții să observe mai bine strada și să se deplaseze în siguranță.

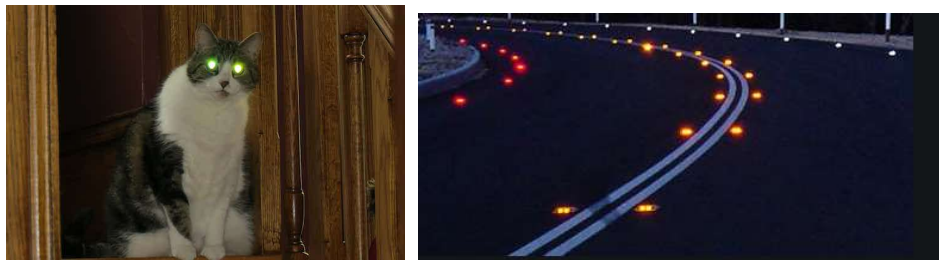


Figura 51. Elemente reflectorizante de tip "ochi de pisică"

4.17.2 "Ochi de molie"

Unele insecte beneficiază de suprafețe anti-reflex fie la nivelul ochilor pentru a putea vedea în condiții de lumină scăzută, fie la nivelul aripilor pentru a reduce reflexiile în scopul camuflării.

Cercetătorii au învățat de la natură și vor să dezvolte straturi de acoperire anti-reflex (Han et al., 2016; Yang și Huang, 2019) inspirate de ochii unei molii (Figura 52-a) pentru a îmbunătăți performanța panourilor solare. La nivelul corneei se găsesc noduli cilindrici nanometrici cu vârful rotunjit (Figura 52-b) care absorb lungimile de undă din spectrul vizibil, indicele de refracție crescând gradual, de la 1 cât are aerul la 1,54 pentru chitină, pe măsură ce lumina intră în ochii moliei, reflexia reducându-se de aproape 10 ori. Acest lucru permite moliei să evite prădătorii și să vadă prada în întuneric (Parker și Townley, 2007; Dacey, 2009; Hwang et al., 2015).

Structura de tip "ochi de molie" a fost reprodusă pentru prima dată la scară prin încrucișarea a trei rețele de difracție la 120° prin litografie, fiind folosită ca suprafață anti-reflex pe ferestrele din sticlă în Scandinavia. Astăzi, o astfel de structură poate fi realizată extrem de precis folosind tehnica de gravare cu fascicul

de electroni (Figura 52-c) pe suprafețe din plastic sau lentile (Boden și Bagnall, 2006; Parker și Townley, 2007; Han et al., 2016).

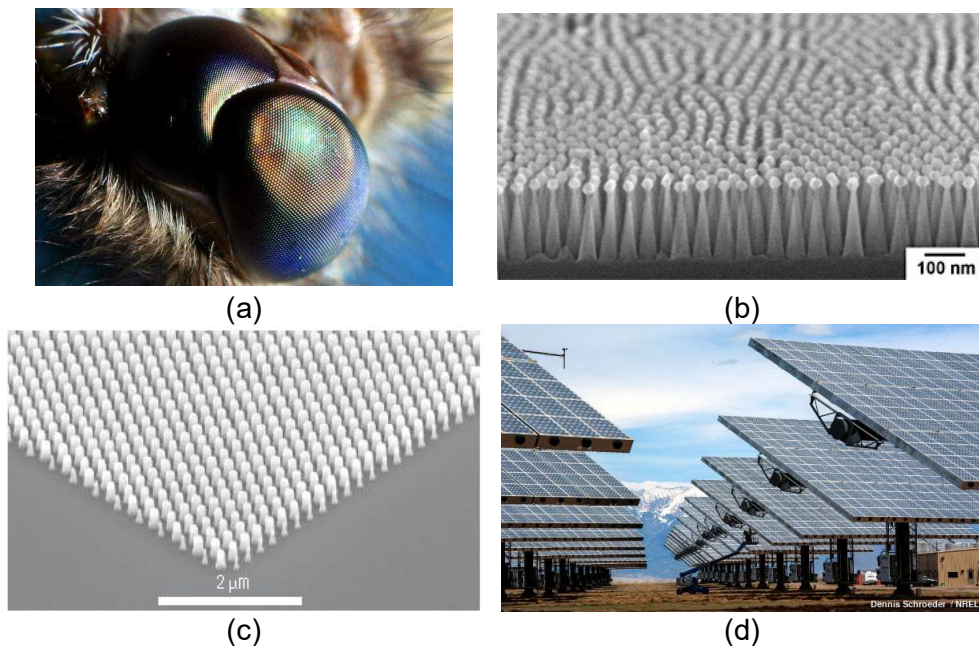


Figura 52. Suprafețe antireflex bionice: (a) ochii unei molii; (b) vedere la microscopul electronic asupra nodurilor din corneea ochilor; (c) suprafață bionică realizată prin gravare cu fascicul de electroni; (d) panouri solare ce ar putea fi îmbunătățite din punct de vedere al reflexiei radiației

4.17.3 Culori vii și electrizante

În natură există viețuitoare, plante și animale, care prezintă diferite nuanțe de culoare datorită pigmentilor chimici din organism. De exemplu, pasărea flamingo chiar dacă se naște având culoarea gri, ea devine o nuanță de roz datorită pigmentului numit caroten pe care îl extrage din crustaceele pe care le mănâncă. Însă cele mai vii culori se găsesc la fluturi. Există aproximativ 165000 specii de fluturi (nimfalide) a căror colorit este foarte divers creând diverse modele folosite de exemplu cu scopul de a se camufla sau a transmite mesaje prădătorilor că pot fi toxici (Parker și Townley, 2007).

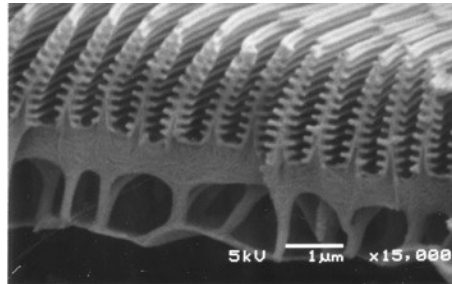
Dintre toate culorile întâlnite la viețuitoare, albastrul este cel mai rar. Mai mult, o culoare "țipătoare" de albastru electrizant este cu adevărat ceva rar și se întâlnește la fluturii *Morpho Menelaus*. Aceștia trăiesc de obicei la tropice și atunci când se odihnesc își închid aripile iar pe fețele inferioare se pot observa nuanțe închise de culoare, precum maro sau negru, și chiar modele în formă de "ochi" (Figura 53-a) ce îi ajută să se camufleze în mediul înconjurător, culori ce sunt create datorită pigmentilor.



(a)



(b)



(c)

Figura 53. Fluturile *Morpho Menelaus*: a) aripile închise; b) aripile deschise; c) formațiuni de tip "brăduț" (Kinoshita et al., 2002)

Însă, fețele superioare ale aripilor, atunci când sunt deschise (Figura 53-b), prezintă o nuanță de culoare albastru electric care nu se datorează pigmentilor ci unui mozaic de solzi. Fiecare solz prezintă de-a lungul lui ca niște brazde formate din rânduri de formațiuni ce se aseamănă cu niște brăduți cu ramurile de ordinul nanometrilor (Figura 53-c).

Aceste formațiuni funcționează ca o rețea de difracție în care în funcție de numărul de ramuri, de spațiul de aer dintre ele și de grosimea lor, reflectă doar anumite lungimi de undă creând nuanța puternică de albastru (Kinoshita et al., 2002; Smith, 2009; Parker și Townley, 2007). Cercetătorii au observat că, culoarea albastră rezultă doar atunci când aripile sunt uscate, adică atunci când între ramurile brăduților există aer, altfel, dacă se interpune de exemplu apă, culoarea nu v-a mai apărea. Din acest motiv, aripile fluturului *Morpho Menelaus* sunt hidrofobe și nu se udă atunci când plouă. Interferența multistrat ce apare la aceste formațiuni este similară cu interferența monostrat care determină culorile din bulele de săpun.

Nuanța de albastru se mai regăsește și la alte viețuitoare precum la penele unor păsări sau la gândacul de bălegar. Plecând de la mecanismul de creare a culorii microstructurale al fluturului *Morpho Menelaus*, cercetătorii au dezvoltat structuri pe diverse materiale ce se pot colora și în alte nuanțe de culoare (Parker și Townley, 2007; De Bellis et al., 2020; Huang et al., 2016; Zhang și Chen, 2015; Ruiz-Clavijo et al., 2018; Zyla et al., 2020).

Mark Miles, un absolvent de inginerie electrică al MIT, s-a întrebat: "Unde ți-ai dori culori așa de vii într-o structură subțire? Desigur, într-un afișaj electroni". Qualcomm a cumpărat în 2004 compania lui Miles care dezvoltase tehnologia și a

produs afișajul Mirasol. "Exploatăm fenomenul de interferență optică" a spus Brian Gally, director senior management de produs la Qualcomm.

Sub suprafața sticlei se găsește o rețea de modulatori interferometrici, în esență oglinzi microscopice (10 până la 50 μm^2) care se mișcă în sus și în jos, cu viteze de microsecunde, pentru a crea culoarea potrivită. La fel ca aripile fluturului, "afișajul preia lumina ambientală din jurul nostru, lumina albă sau razele soarelui și, prin interferență ne trimite înapoi o imagine color", spune Gally.

Spre deosebire de ecranele LCD și OLED convenționale, Mirasol nu trebuie să genereze propria lumină. Luminozitatea afișajului crește automat în funcție de lumina ambientală. Ca rezultat, Mirasol consumă o zecime din puterea unui cititor LCD. Qualcomm a folosit afișajul într-un e-reader, smartwatch și smartphone.

În 2013, Qualcomm a renunțat la producția Mirasol, după ce au pierdut 300 milioane de dolari iar în 2015 au vrut să vândă licența Mirasol pentru 142 milioane de dolari dar nimeni nu s-a arătat interesat, piața smartphone-urilor și tabletelor fiind ferm axată pe ecranele LCD și OLED.

Oamenii de știință ar putea să folosească acest efect optic pentru securitatea bancară, pentru criptarea informației cuprinse de semnături optice, pentru sistemul de tipărire a bancnotelor, cardurilor sau alte obiecte/ documente de valoare (de ex. pașaportul), împiedicând falsificarea.

Folosind aripile fluturului drept model, cercetători din Japonia și China au proiectat baterii solare care au absorbit mai multă lumină decât celulele fotosensibile convenționale.

Culoarea stridentă a fluturului *Morpho* a inspirat și pe creatorii de modă, cum este designerul Donna Sgro din Sydney care s-a autodescris "lepidopterist ocazional", a creat rochii dintr-o țesătură numită Morphotex, un material albastru electrizant fără pigmenți de culoare, care formează culoarea prin interferență optică.

4.18 Sistem de ventilație inspirat din mușuroiul termitelor

Termitele trăiesc în cuiburi înalte (mobile) de 6 m alcătuite din pământ, scoarță de copac, nisip și salivă de termite care face structura să fie foarte dură, asemeni betonului (Emerson, 1938; Bonabeau et al., 1998; Noirot și Darlington, 2000).

Întrucât trăiesc în grupuri de peste 2 milioane de exemplare, termitelile sunt sensibile la căldură. Chiar dacă afară este o temperatură de aproape 40°C, în interiorul cuibului temperatura se menține la aproximativ 30°C. Sistemul de ventilație a aerului realizat de către termite se poate asemăna cu un plămân care inspiră și expiră aerul. Suprafața exterioară a mobilei este poroasă iar fluxul de aer care pătrunde, preia bulele de gaz cu aer cald venit de jos și le elimină prin vârf. În subteran, cuibul are săpate canale prin care pătrunde aerul mai rece

Mick Pearce a construit în 1996 în capitala Harare, Zimbabwe, prima clădire cu sistem natural de răcire, numită Eastgate Center (Figura 54). Ea este alcătuită din plăci de beton la fiecare etaj și cărămizi, materiale ce au proprietatea de a absorbi

căldura fără să o emane înapoi. De asemenea, clădirea prezintă ferestre mici pentru a mări suprafața exterioară în vederea degajării căldurii pe timpul nopții.

La etajele inferioare există ventilatoare care trag aerul răcoros de afară pe timpul nopții și îl direcționează la etajele superioare până la acoperiș unde este eliminat prin hornuri. Astfel, consumul de energie al acestei clădiri este cu 35% mai mic față de alte clădiri din Zimbabwe iar temperatura interioară pe timpul zilei este menținută la aproximativ 27°C iar pe timpul nopții la aproximativ 15°C (Turner și Soar, 2008; Frecnch și Ahmed, 2010; Gunnell et al., 2009).

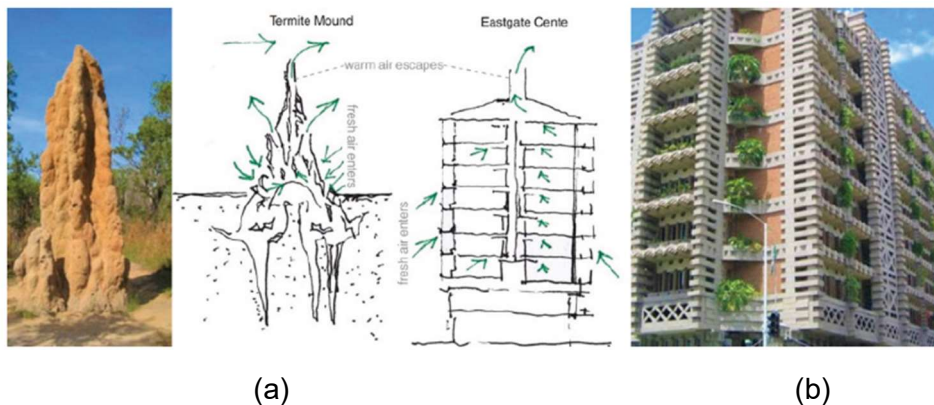


Figura 54. (a) Sistem natural de ventilație la termite și (b) clădirea Eastgate Center din Harare, Zimbabwe (Frecnch și Ahmed, 2010)

Un exemplu recent de biomimetism se regăsește în cuvântul managemANT propus de Johannes-Paul Fladerer și Ernst Kurzmann (2017,2019) care descrie folosirea strategiilor comportamentale a furnicilor în economie și management. Impactul pe termen lung al acestei abordări biomimetice a fost menționat într-un raport al Institutului de Economie și Afaceri Fermanian în 2013 la cererea Grădinii Zoologice din San Diego.

5. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND COMPORTAREA TRIBOLOGICĂ A UNOR TIPURI DE POLIMERI

5.1 Polimeri – elemente introductive

În contextul actual de progres tehnologic, materialele convenționale cum sunt metalele și aliajele, sunt înlocuite de polimeri în multe domenii ca de exemplu: industria automobilelor, industria aerospațială, industria de bunuri de uz casnic, jucării, în electronică, ca materiale de împachetare și încapsulare ș.a.

Polimerii naturali se regăsesc sub diverse forme în: carnele animalelor, carapacele broaștelor testoase, rășini de conifere, asfalt și gudron obținut în urma distilării materiilor organice.

Denumirea de **polimer** vine din limba greacă **poli = multe, numeroase** și **meros= părți**. Structura moleculară a polimerilor este creată printr-o reacție chimică numită *polimerizare*, în care monomerii sunt uniți între ei prin legături covalente formând un lanț molecular. Pe măsură ce polimerul crește în dimensiune, punctul de topire sau de înmuiere crește, iar polimerul devine mai rezistent și mai rigid. Natura legăturii chimice dintre atomii din lanțul polimeric influențează în mod direct proprietățile mecanice, tribologice sau electrice (Bele și colab., 2015; Cârlescu, 2013; Ioniță și colab.,2015).

De obicei, cei mai mulți polimeri au la bază fie o hidrocarbură fie un silicon. Polimerii sunt materiale moi a căror proprietăți mecanice depind de structura chimică (constituenți moleculari), de domeniul temperaturii de funcționare și viteza de deformare. Densitatea, rigiditatea, duritatea, comportarea la frecare și la uzură și durabilitatea sunt doar câteva dintre ele. Aproape toate proprietățile depind de lungimea lanțului polimeric, acestea fiind dobândite prin modificarea lungimii lanțului sau amestecând diferiți polimeri. Astfel, structura chimică joacă un rol important în clasificarea polimerilor. În general, polimerii pot fi clasificați în materiale plastice și cauciucuri, materialele plastice putând fi în continuare împărțite în termoplastice și termorigide (Brinson, 2013).

Polimerii termoplastici au o structură liniară sau ramificată (Figura 5.1-a), o densitate mai mică și un coeficient de expansiune termică mai mare decât al metalelor sau ceramicilor. Ei au o temperatură de tranziție vitroasă (T_g) care este de obicei peste temperatura camerei. Prin urmare, materialul este solid într-un domeniu larg de temperatură și vâscos atunci când este încălzit la numai câteva sute de grade. Acești polimeri pot fi supuși la cicluri repetate de încălzire-răcire fără degradare semnificativă. Astfel, polimerii termoplastici sunt materiale reciclabile. Rezistența lor chimică îi face potriviți pentru medii puternic corozive, însă fără fluctuații mari de temperatură. Cele mai uzuale tipuri de polimeri termoplastici sunt polietilena (PE), polipropilena (PP) și polistirenul (PS), iar produse alcătuite din materiale termoplastice sunt sticlele de plastic, sacoșele de plastic, adezivi și materiale de etanșare etc. (Brinson, 2013).

Polimerii termorigizi se disting prin structura lor covalentă tridimensională puternic reticulată (Figura 1.1-b). Ei nu pot tolera cicluri repetate de încălzire precum

polimerii termoplastici. În loc să aibă temperatură de topire, ei au temperatură de degradare. Cu alte cuvinte, dacă sunt încălziți, ei se înmoaie și curg. Ulterior, ei nu pot fi reîncălziți pentru a deveni iar vâscoși ci se degradează și se carbonizează. Comportamentul polimerilor termorezistenți seamănă în general cu cel al solidelor fragile fără ductilitate. Spre deosebire de polimerii termoplastici, ei sunt capabili să funcționeze în medii cu temperaturi mai mari. Modulul lor de elasticitate este de două sau trei ori mai mare decât cel al termoplasticilor. Procesul de reticulare elimină riscul ca produsul să se re-topească atunci când este încălzit, făcând polimerii termorigizi ideali pentru aplicații cu temperaturi ridicate, cum ar fi componentele electronice și electrocasnice. Exemple de polimeri termorezistenți sunt poliuretanii (PU), poliimidele, epoxidicele și rășinile siliconice termorigide. Exemple de produse din astfel de materiale sunt piese turnate, plăci de circuite integrate și alte materiale plastice armate cu fibre (Brinson, 2013).

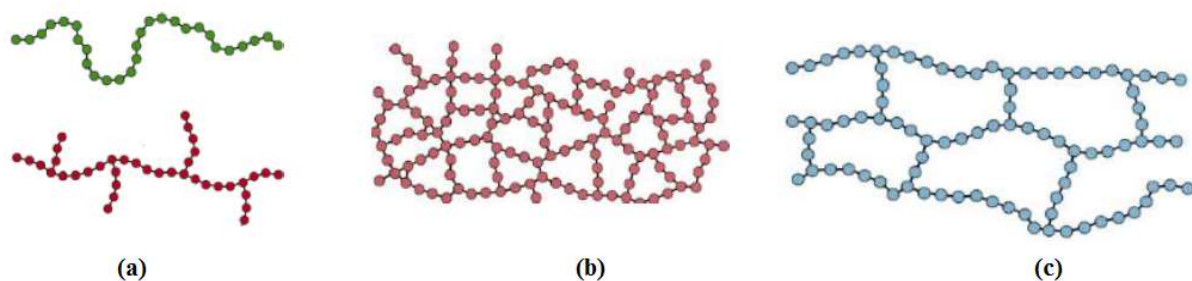


Figura 5.1 Structura moleculară a polimerilor: (a) termoplastici; (b) termorigizi și (c) elastomeri (Brinson, 2013)

Elastomerii sunt polimeri solizi (Figura 1.1-c) cu capacitate mare de deformare la forțe relativ mici, în comparație cu materialele metalice, și cu o temperatură de tranziție vitroasă mult peste temperatura ambiantă. Alungirea unei bucăți de polimer solid prin aplicarea unei forțe, duce în primul rând la descâlcirea lanțurilor macromoleculare și ca o consecință, la alunecarea lanțurilor între ele. Acest comportament este cunoscut sub numele de *vâsco-elasticitate* (Rosen, 1982), (Aklonis și MacKnight, 1983) și este responsabil de flexibilitatea polimerului. La nivel macromolecular **descâlcirea lanțurilor dau proprietatea de elasticitate reversibilă**, în timp ce **curgerea lanțurilor contribuie la comportamentul vâscos**. Comportamentul vâsco-elastic se referă la energia mecanică stocată și la pierderile mecanice din polimer. Datorită nivelului ridicat de încălzire, este clar că polimerii amorfi sunt mai flexibili decât cei parțial cristalini. Pentru a preveni alunecarea lanțurilor polimerice și, prin urmare, pentru a îmbunătăți comportamentul elastic de revenire, mobilitatea lanțurilor trebuie scăzută. Acest lucru se poate realiza prin lipirea chimică a lanțurilor polimerice în anumite poziții, reacție cunoscută sub numele de *reticulare* (Cârlescu, 2013; Ioniță și colab., 2015).

Cel mai utilizat polimer natural este cauciucul natural, obținut din seva arborelui de cauciuc. Acesta are însă utilizări limitate, deoarece devine casant când este supus la temperaturi scăzute și se topește atunci când este încălzit. Charles Goodyear, descoperă accidental, în anul 1839, că încălzirea la 170°C a unui

amestec format din seva arborelui de cauciuc și sulf duce la reticularea cauciucului, procesul purtând numele de *vulcanizare*. Astfel, proprietățile cauciucului se schimbă, acesta devenind mai flexibil și mai stabil în funcție de temperatură. Această descoperire a revoluționat industria cauciucului. În a doua jumătate a secolului 19 cererea de cauciuc a crescut odată cu utilizarea lui ca izolator în industria electrică și inventarea anvelopelor.

Primul polimer sintetic, un polimer fenol- formaldehidră, a fost introdus sub numele de „bachelită” și descoperit de Leo Baekeland în anul 1909. Rayon-ul, prima fibră sintetică a fost descoperită în 1911, ca înlocuitor pentru mătase. Cauciucul butadien-stirenice (SBR) este cel mai important și cel mai utilizat cauciuc sintetic și este obținut prin polimerizarea butadienei și stirenei în diferite rapoarte (Rosen, 1982).

Aplicațiile pentru cauciucul **sintetic** cuprind o gamă largă și diversificată, precum: anvelope, adezivi și benzi adezive, pardoseli din cauciuc, furtunuri pentru uz industrial, garnituri, piese de cauciuc cu inserții metalice și componente ale sistemelor anti-vibrații, garnituri de etanșare, produse farmaceutice, produse obținute prin imersie precum mănuși din latex, catetere și multe altele.

Din punct de vedere ingineresc, cauciucurile sunt materiale omogene și izotrope care manifestă deformații foarte mari. De exemplu, într-un test de tracțiune, o probă se poate deforma de până la 10 ori din lungimea inițială. Din datele testelor de tracțiune se poate observa că, diagrama tensiune-deformație (σ - ϵ) este puternic neliniară (Figura 5.2). Astfel, legea lui Hooke nu poate fi folosită pentru acest domeniu larg de deformații și, de asemenea, nu se poate atribui o valoare corectă pentru modulul Young decât în zona deformațiilor foarte mici. Mai mult, când o probă de cauciuc este supusă la încărcare ciclică apare fenomenul de înmuiere a materialului, observat pentru prima dată de Bouasse și Carriere în 1903 și cunoscut astăzi sub numele de efect Mullins (Mullins, 1947).

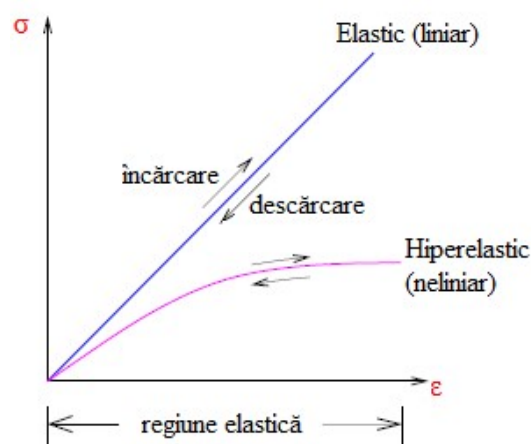


Figura 5.2 Tipuri de răspuns tensiune-deformație la solicitare uniaxială

Cauciucurile și materialele asemănătoare lor sunt de obicei modelate ca materiale hiperelastice incompresibile, cu un coeficient Poisson apropiat de 0,5. Pentru a descrie comportamentul mecanic al acestor materiale trebuie aplicată teoria

elasticității neliniare cu ecuații constitutive complexe, deoarece componentele structurale sunt supuse în practică la deformații mari. Alte exemple de materiale cu comportament hiperelastic sunt țesăturile din lycra (Garcia și colab., 2005) sau anumiți polimeri fotosensibili (Berselli și colab., 2011).

5.2 Comportamentul la frecare a polimerilor

Myshkin și colab. (2005) concluzionează în lucrarea „Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer”, că studiul tribologic al materialelor plastice se bazează pe analiza celor trei componente de bază care intră în interacțiune:

- legăturile care apar la suprafață în momentul contactului dintre două materiale
- analiza fenomenelor de rupere și exfoliere a materialelor în jurul zonei de contact cât și în zona de contact
- aria reală de contact.

5.2.1 Adeziunea

Există multe teorii în ceea ce privește mecanismul de formare al adeziunii polimerilor, cea mai des întâlnită teorie este cea a cercetătorilor Bowden, Frank și Tabor (1964). Teoria descrisă de aceștia presupune că poate exista doar o simplă legătură de adeziune dintre materialul polimeric și materialul cu care va intra în contact.

Buckley (1981) descrie în cartea sa și alte teorii care stau la baza cercetărilor fenomenelor de adeziune ale polimerilor. Una dintre aceste teorii se referă la faptul că polimerii ocupă spațiile rugozităților substratului suprafeței de contact, realizându-se astfel o rezistență la alunecare între cele două suprafețe. Un alt mecanism evidențiat de Buckley (1981) în lucrarea sa este acela în care macromoleculele sunt absorbite în substratul materialului de contact și reținute acolo de către diferite forțe de atracție. Această teorie presupune existența permanentă a unui strat interfacial între polimer și substratul materialului de contact.

O altă teorie considerată de către Buckley (1981) este teoria difuziei, în care macromoleculele polimerului difuzează în substratul de contact eliminând astfel stratul interfacial.

Alți autori au sugerat că mecanismul adeziunii implică forțe electrostatice create între electronii polimerului și cei ai substratului de contact (Deryagin și Smilga, 1960). Teoria presupune că există un transfer de electroni de la o suprafață la alta, iar în final cele două suprafețe vor avea sarcini diferite de cele inițiale.

Deși toate aceste teorii pot fi aplicate în anumite cazuri particulare, teoria adeziunii polimerilor este cea mai potrivită pentru descrierea acestui mecanism de frecare a polimerilor (Buckley, 1981).

Myshkin și colab. (2005) explică fenomenul de adeziune între două suprafețe în contact prin forțele moleculare de atracție și repulsie la nivelul suprafețelor care se aproprie una de cealaltă. Aceste forțe se neutralizează unele pe celelalte la o anumită distanță de separație z_0 . Dacă distanța dintre suprafețe este $z < z_0$, va avea loc fenomenul de repulsie, iar când $z > z_0$ va apărea atracția.

Modelele Johnson-Kendal-Roberts (JKR) (Johnson și colab., 1971) și modelul Deryagin-Muller-Toporov (DMT) (Deryagin BV și colab., 1975) sunt două dintre cele mai cunoscute modele care descriu matematic fenomenul de adeziune de contact. Myshkin și colab. (1998, 2004, 2005) au făcut o analiză în care au comparat cele două modele și au găsit că modelul JKR se aplică mai bine pe corpuri cu proprietăți asemănătoare polimerilor.

5.2.2 Modelul JKR

Contactul elastic dintre o sferă și un semispațiu este analizat considerând forțele Van der Waals' care împreună cu încărcările aplicate comprimă corpurile aflate în contact. Forța de adeziune moleculară F_{ad} dintre o sferă cu raza R și o suprafață plană este dată de relația JKR (Myshkin și colab., 2014), (Deladi, 2006):

$$F_{ad} = -\frac{3\pi RW}{2} \quad (1.1)$$

unde W lucru mecanic de adeziune la nivelul suprafețelor în contact generat de forțele de interacțiune moleculară sau interatomice la nivelul celor două suprafețe în contact, în N/m.

Ca urmare a unei forțe exterioare F_z aplicate și a adeziunii, modelul JKR permite calculul razei cercului de contact dintre o bilă și suprafața plană cu relația:

$$a = \sqrt[3]{\frac{R}{E_{tot}} \cdot (F_z + 3\pi RW + \sqrt{6\pi RWF_z + (3\pi RW)^2})} \quad (1.2)$$

Semnificația termenilor este următoarea:

- F_z = forța normală, în N;
- R = raza bilei, în m;
- a = raza suprafeței de contact bilă-plan, în m;
- $E_{tot} = \frac{4}{3} \left[\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right]^{-1}$, unde E_1 și E_2 reprezintă modulul de elasticitate pentru bilă și, respectiv pentru plan, în Pa;
- ν_1 și ν_2 sunt coeficienții lui Poisson pentru cele două materiale în contact.

Dacă $W = 0$ atunci se obține ecuația lui Hertz, iar în cazul în care $W > 0$ aria de contact va fi mai mare decât cea obținută după modelul Hertzian la încărcare normală.

5.2.3 Componenta deformației din frecarea polimerilor

O altă sursă a forței de frecare este atribuită deformației ce are loc când asperitățile a două suprafețe care alunecă intră în contact. Asperitățile suprafețelor prezintă o deformație elastică, plastică sau vâscoelastică, în funcție de comportarea materialului. La aplicarea inițială a forței asupra polimerului, deformația este în principal plastică dacă polimerul se află în stare cristalină sau vâscoelastică (sau chiar vâscoplastică) dacă polimerul se află într-o stare elastică puternică (Myshkin și colab., 2005).

Zhang (2004) analizează componenta dată de interacțiunea rugozităților cu suprafața elastomerilor și stabilește că forța tangențială generată de deformarea

cauzată de rugozități depinde de unghiul θ de înclinare al vârfurilor rugozităților, conform relației:

$$f_d \approx \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1.3)$$

Vârfurile asperităților pentru suprafețe rectificade au unghiul $\theta > 160^\circ$, iar coeficientul f_d are o valoare mai mică de 0,05. În contactul elastic, componenta f_d este adesea neglijată datorită valorii sale mici.

Există și alte mecanisme ale disipării de energie atunci când există deformație. Prin urmare, când un polimer cu proprietăți vâscoelastice alunecă pe o suprafață dură rugoasă, energia disipată apare datorită pierderilor mari prin histerezis. Această deformație este cunoscută ca frecare datorită histerezisului elastic (Myshkin și colab., 2005). În plus, la testarea de tip pin-on-disc a polimerilor cu modul de elasticitate scăzut, de regulă în capătul pinului este o bilă din oțel care produce o urmă dată de deformarea elastică a polimerului, formarea acestei urme are drept consecință o pierdere de energie care se regăsește în forța de frecare (Yamaguchi, 1990; Haugstand și colab., 1999).

5.2.4 Aria reală de contact

Contactul dintre două suprafețe se realizează inițial prin intrarea în contact a asperităților cu înălțimea cea mai mare, aflate în poziții opuse. Pe măsură ce forța de apăsare crește noi perechi de asperități, cu înălțimi mai mici, intră în contact. Aceste contacte formează puncte de contact individuale. Mulțimea punctelor de contact individuale formează aria reală de contact A_r .

Componenta de alunecare F_s are următoarea expresie (Yamaguchi, 1990):

$$F_s = A_r \cdot \tau \quad (1.4)$$

unde τ reprezintă tensiunea tangențială la suprafața de contact.

În estimarea ariei reale de contact a materialelor plastice, sunt luate în considerare proprietățile polimerilor, încărcarea, viteza de alunecare precum și temperatura (Myshkin și colab., 2005). Cercetările inițiale au abordat problema de contact între un corp rigid și un semispațiu elastic neted. În acest sens Yamaguchi (1990) dezvoltă modelul bilă-suprafață plană cu utilizarea legii lui Meyer ce ia în considerare urma lăsată de indentarea polimerului cu o bilă.

Astfel, pentru o bilă cu diametrul D apăsată pe un polimer cu o forță F_z , aria reală de contact dintre bilă și polimer este dată de relația:

$$A_r = \frac{\pi}{4} \left(\frac{1}{R}\right)^{\frac{2}{n}} \cdot D^{\frac{2(n-1)}{n}} \cdot F_z^{\frac{2}{n}} \quad (1.5)$$

Încercările experimentale făcute de Yamaguchi (1990) cu bile din oțel pe diverși polimeri au permis stabilirea unor valori pentru exponentul n cuprinse în limitele 2,6 – 2,8. Totodată, Yamaguchi a stabilit că pentru un material perfect elastic exponentul $n=3$ în timp ce pentru un material perfect plastic $n=2$. De asemenea, pentru constanta K , Yamaguchi (1990) găsește valori între 54.8 și 15.3 funcție de tipul de polimer testat.

Dacă se raportează componenta de alunecare F_s din relația (1.4) la forța de apăsare F_z și se ține cont de aria reală de contact dată de relația (1.5), se obține următoarea expresie pentru coeficientul de frecare la alunecare:

$$\mu_s = \frac{F_s}{F_z} = \frac{\pi}{4} \cdot \tau \cdot \left(\frac{1}{K}\right)^{\frac{2}{n}} \cdot D^{\frac{2(n-n)}{n}} \cdot F_z^{\frac{2}{n-1}} \quad (1.6)$$

Utilizând testarea la frecare cu bilă având diametrul $D=9,525\text{mm}$ ($3/8''$) la forțe de apăsare cuprinse între 100 N și 1500 N, Yamaguchi (1990) obține variațiile coeficientului de frecare în funcție de forța de încărcare sub formă liniară, într-o diagramă logaritmică prezentată în figura 5.3. Materialele utilizate sunt următoarele tipuri de polimeri: PC (Policarbonat), PS (Polistiren), MF (material plastic termorigid format prin polimerizarea melaminei cu formaldehida) și PMMA (Polimetilmetacrilat).

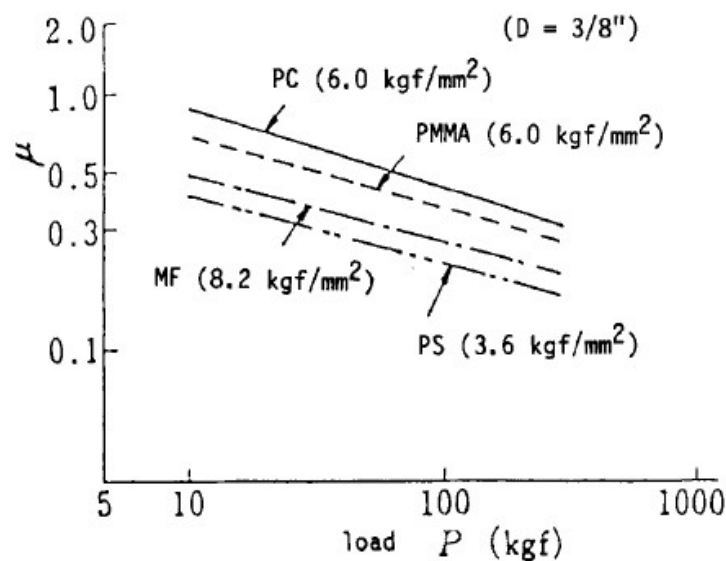


Figura 5.3 Variația coeficientului de frecare de alunecare în funcție de forța de apăsare pentru o bilă cu diametrul de 9,525mm în contact cu diverși polimeri (Yamaguchi, 1990)

Cu ajutorul diagramelor și a relației (1.6) s-au determinat valorile tensiunilor tangențiale dezvoltate la alunecarea bilei pe suprafețele polimerilor cu valori cuprinse între (36 MPa și 82 MPa). Un aspect esențial al relației (1.6) constă în faptul că există o dependență exponențială între coeficientul de frecare și forța de încărcare F_z de forma:

$$\mu_s \sim F_z^{-\alpha} \quad (1.7)$$

unde exponentul $\alpha < 1$.

Modelul Yamaguchi (1990) a fost ulterior dezvoltat și de alți cercetători stabilindu-se relații mai complexe pentru aria de contact, în condițiile unor suprafețe de contact de dimensiuni mai mari, cu luarea în considerare a distribuției rugozităților, a înălțimilor acestora, a ariei aparente de contact, a caracteristicilor mecanice ale polimerilor, a temperaturii etc.

Un astfel de model este modelul Greenwood-Williamson de calcul a raportului dintre aria reală și aria aparentă de contact, model prezentat pe larg de către Myshkin și colaboratorii (2005). Quaglini și Dubini (2011) utilizând testări pe 5 tipuri de polimeri autolubrifianți, Polietilentereftalat (PET), Poliamidă 6 (PA6), fluorură de poliviniliden (PVDF), polietilentă de înaltă densitate (UHMWPE) și Politetrafluoretilenă (PTFE), au analizat influența presiunilor nominale de contact asupra coeficientului de frecare și au stabilit relații de dependență a coeficientului de frecare în funcție de presiunea de contact sub următoarea formă:

$$\mu = \begin{cases} \frac{k_1}{(p_n)^\alpha}, & \text{pentru } p_n < p_Y \\ \frac{k_2}{(p_n)^\beta}, & \text{pentru } p_n \geq p_Y \end{cases} \quad (1.8)$$

unde presiunea nominală $p_n = F_z/A_n$ iar p_Y reprezintă o presiune de contact limită corelată cu tranziția de la deformarea elastică la deformarea plastică a polimerului. Exponenții α și β depind de structura internă a polimerului și forțele de adeziune la suprafața de contact iar coeficienții k_1 și k_2 depind de starea rugozității suprafețelor în contact. Relațiile (1.8) conduc, de fapt la aceeași dependență de forma dată de ecuația (1.7) obținută pe cale analitică.

5.2.5 Efectul încărcării asupra frecării

Influența încărcării asupra coeficientului de frecare în cazul polimerilor prezintă numeroase particularități date, pe de o parte de comportamentul vâscoelastic al polimerilor și, pe de altă parte, de metodologia de testare. În numeroase cazuri, coeficientul de frecare scade odată cu creșterea încărcării, relația de forma ecuației (1.6) fiind valabilă.

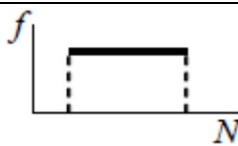
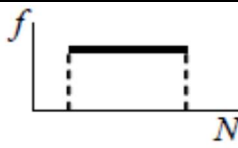
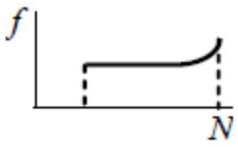
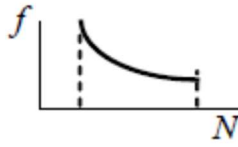
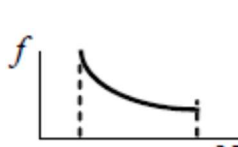
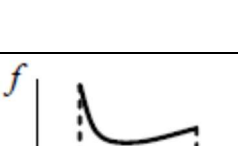
Există și cazuri în care coeficientul de frecare nu variază cu încărcarea (tribosistem de alunecare PTFE în contact cu oțelul) dar și cazuri în care coeficientul de frecare prezintă în timp fluctuații importante.

Astfel, Kragelskii (1982) a descris frecarea polimerilor în funcție de variația încărcării arătând că valoarea coeficientului de frecare are o zonă de minim în funcție de încărcare, minim care corespunde formei de tranziție de la contactul elastic la cel plastic. Asemenea comportament poate fi explicat prin deformarea elastică a asperităților de la suprafață (Ortega-Saenz și colab., 2008) la creșterea încărcării după care, ca urmare a intrării contactului în domeniul plastic, coeficientul de frecare crește odată cu creșterea încărcării.

O sinteză a diverselor comportări la frecare în funcție de încărcare a unor polimeri este prezentată în Tabelul 5.1 (Myshkin și colab., 2005).

Scăderea coeficientului de frecare la creșterea presiunii de contact (creșterea încărcării) este evidențiată experimental de către numeroși cercetători. Astfel, în figura 5.4 se prezintă variații ale coeficientului de frecare pentru contactul oțel-poliamidă PA6 și oțel-polietilenă de înaltă densitate UHMWPE (Quaglini și Dubini, 2011).

Tabelul 5.1 Scurt istoric al efectului încărcării asupra forței de frecare (Myshkin și colab., 2005)

Material și încărcare	Reprezentare grafică	Autorii cercetărilor
2 – 15 N, oțel – polimer (PTFE, PTFCE, PVC, PVDC, PE)		Bowers și colab. (Myshkin și colab., 2005)
10 – 40 N, oțel – polimer (PTFE, PE, PMMA, PS)		Shooter și Thomas (Myshkin și colab., 2005)
10 – 100 N, oțel – polimer (PTFE, PE, PMMA, PVC, nylon)		Shooter și Tabor (Myshkin și colab., 2005)
oțel – polimer (PTFE, PE, nylon)		Rees (Myshkin și colab., 2005)
Teoretic, oțel - cauciuc		Schallamach, Bartenev și Lavrentev (Myshkin și colab., 2005)
Teoretic, oțel – cauciuc		Kragelskii (Myshkin și colab., 2005)

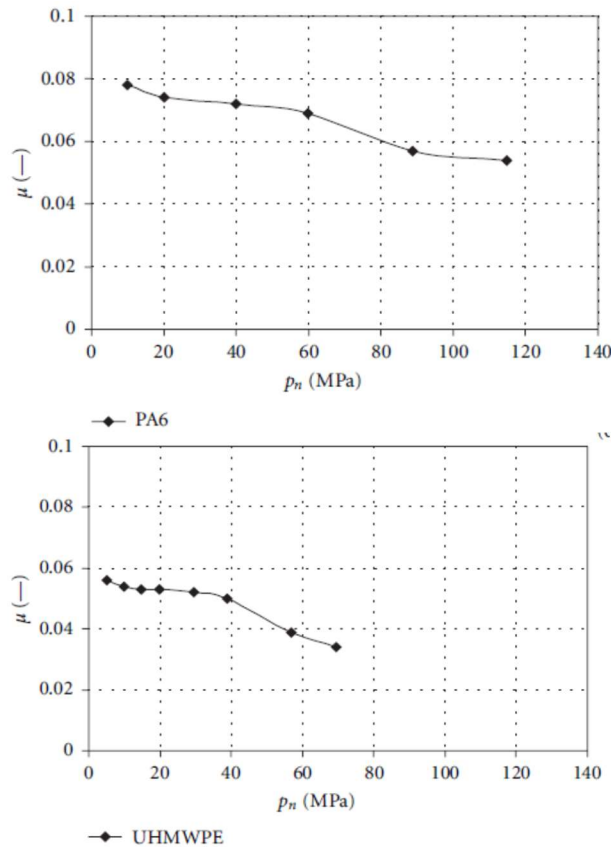


Figura 5.4 Variația coeficientului de frecare cu presiunea de contact pentru poliamida PA6 și polietilena UHMWPE (Quaglioni și Dubini, 2011)

Chowdhury și colaboratorii (2013) obțin prin teste de tip pin-disc scăderi ale coeficientului de frecare cu încărcarea pentru structuri complexe de polimeri cu inserție de fibră de sticlă. În figura 1.5 sunt prezentate o serie de diagrame obținute pentru sarcina de 10 N, 15 N și 20 N, la viteza de alunecare de 1 m/s. Se observă scăderi de până la 40% a coeficientului de frecare odată cu creșterea încărcării.

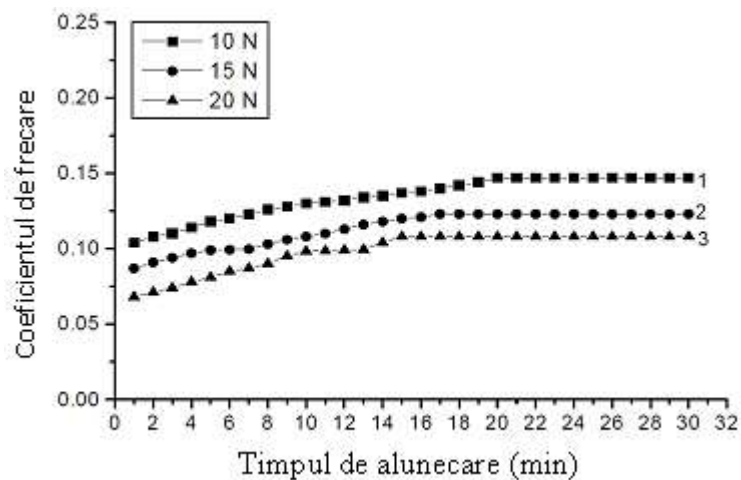


Figura 5.5 Coeficientul de frecare în funcție de durată la diferite încărcări; viteza de alunecare este de 1 m/s (Chowdhury și colab., 2013)

Situații în care coeficientul de frecare are variații mici cu sarcina sunt raportate de către Živić și colaboratorii (2013) în cazul unor testări efectuate pe un microtribometru pin-disc cu discul realizat din polietilenă UHMWPE iar pinul sub formă sferică realizat din alumina (Al_2O_3), în condiții uscate, cu viteze cuprinse între 4 și 12 mm/s și sarcini normale cuprinse între 0,1 N și 1 N. În figura 5.6 sunt prezentate variații ale coeficientului de frecare cu forța normală.

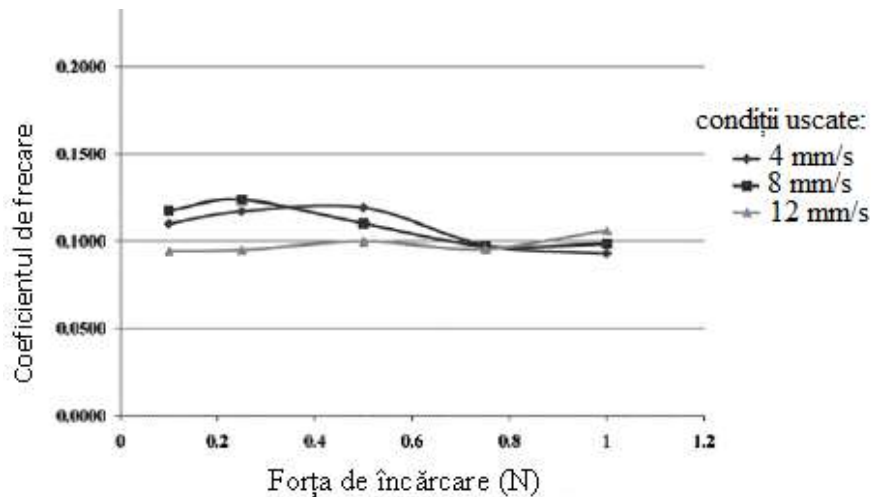


Figura 5.6 Variația coeficientului de frecare în funcție de încărcare (Živić și colab., 2013)

Wang și Dumbledon (2011) au studiat frecarea într-o cuplă de tip cap femural-cavitate acetabulară specifică unei proteze de șold. Pe baza experimentelor in vitro au stabilit că atât pentru capul femural din oțel aliat cu crom și cobalt cât și pentru cavitatea acetabulară din polietilenă UHMWPE, coeficientul de frecare scade la creșterea presiunii de contact conform diagramei din figura 5.7. Funcție de rezultatele testării autorii au stabilit pentru coeficientul de frecare următoarea relație:

$$\mu = 0,1797 \cdot \sigma_0^{-0,331} \quad (1.9)$$

unde σ_0 este tensiunea maximă de contact exprimată în MPa și calculată cu ajutorul relației lui Hertz pentru două suprafețe sferice în contact (una convexă și una concavă).

Literatura prezintă și variații cu creșteri și apoi cu scăderi ale coeficientului de frecare la alunecare în funcție de încărcare, un exemplu fiind cel prezentat în figura 5.8 (Yamaguchi, 1990) pentru contact de alunecare între pin din oțel și disc placat cu nylon, pentru încărcări de până la 500 N și viteze de alunecare de la 0,1 m/s la 1 m/s. Se observă existența unor vârfuri de valori ale coeficientului de frecare între 100 N și 250 N, după care urmează scădere accentuată a coeficientului de frecare la creșterea forței.

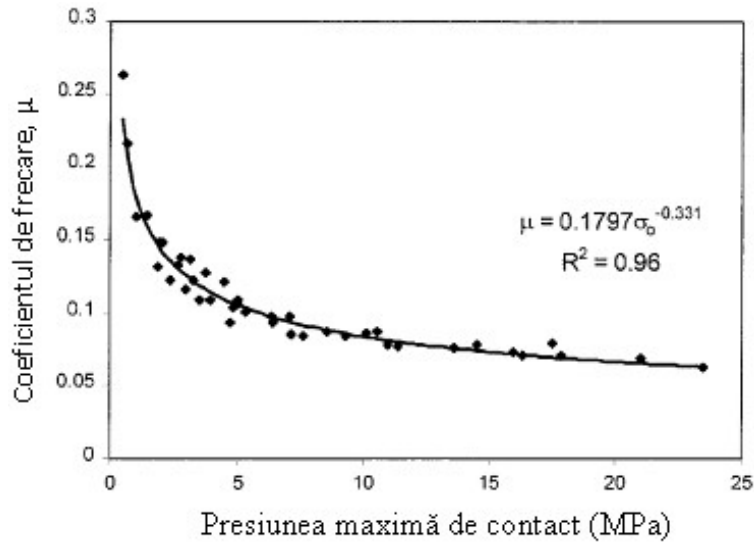


Figura 5.7 Variația coeficientului de frecare în funcție de presiunea de contact dintre capul femural și cavitatea acetabulară la o proteză de șold (Wang și Dumbledon., 2013)

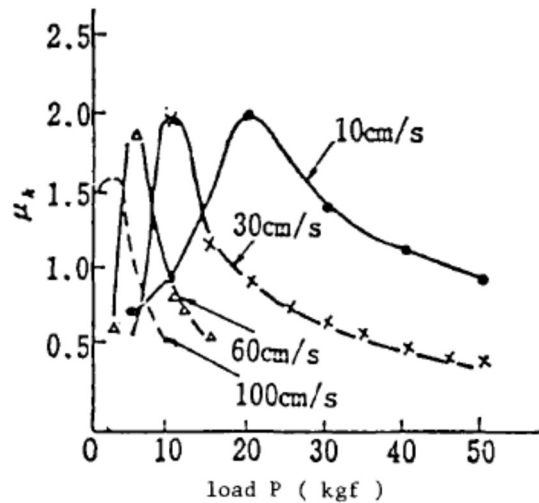


Figura 5.8 Variația coeficientului de frecare în funcție de încărcare și viteză pentru cupla de frecare oțel-nylon (Yamaguchi, 1990)

Procese complexe de scădere și apoi creștere a coeficientului de frecare cu presiunea de contact apar în cazul utilizării unor aditivi în compoziția poliamidei așa cum se poate vedea din figura 5.9 (Yamaguchi, 1990). La creșterea presiunii scade coeficientul de frecare până la o anumită limită, după care începe să crească.

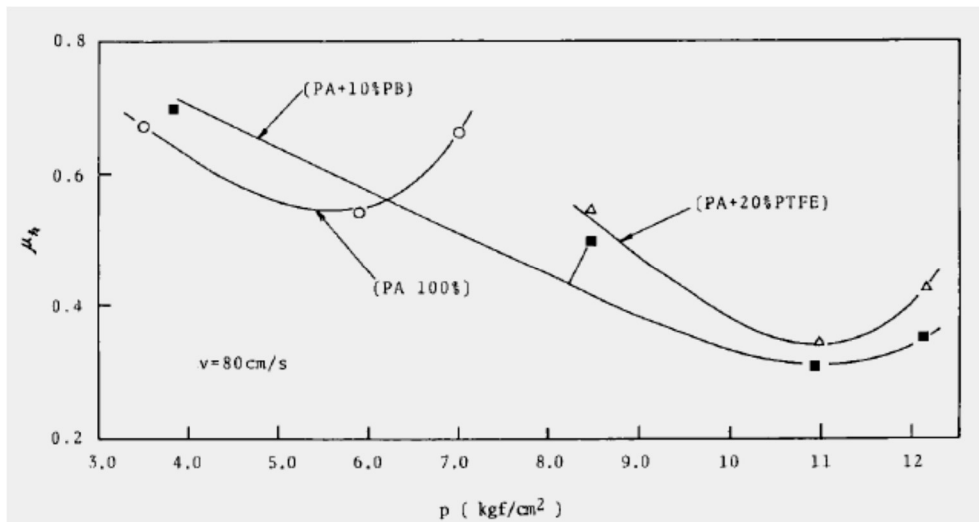


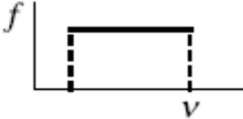
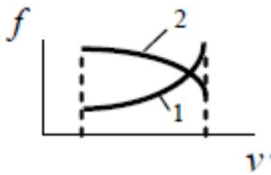

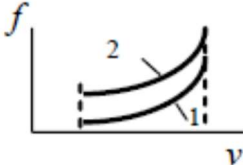
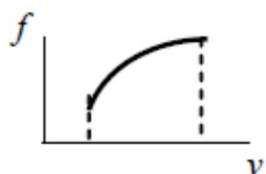
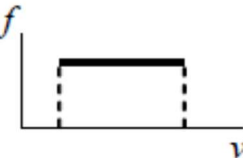
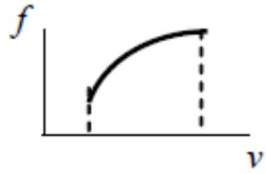
Figura 5.9 Variația coeficientului de frecare în funcție de presiunea de contact pentru frecarea de alunecare în cupla de tip oțel – poliamidă cu diverse concentrații de aditivi (Yamaguchi, 1990)

5.2.6 Efectul vitezei de alunecare asupra frecării

În cazul cuplelor de frecare metalice, de regulă, coeficientul de frecare este independent de viteza de alunecare, în anumite limite de viteză. Această convenție este valabilă cu o bună aproximare doar în cazul când temperatura în zona de contact variază nesemnificativ și, ca rezultat, interfața nu își modifică comportamentul. Însă, separarea efectului vitezei și al temperaturii de frecare prezintă anumite dificultăți. Așadar rezultatele obținute de diferiți cercetători ar trebui privite cu precauție. Există o mare diversitate de comportări ale polimerilor la frecare în funcție de viteza de alunecare. În tabelul 5.2 se prezintă un scurt istoric al cercetărilor privind efectul vitezei de alunecare asupra coeficientului de frecare (Myshkin și colab., 2005).

În domeniul vitezelor mici, frecarea în zona de contact crește cu creșterea vitezei. La viteze mari, comportamentul elastic este predominant în zona de contact, și ca urmare, forța de frecare depinde doar în mică măsură de viteză sau scade cu viteza. În plus, trebuie să se țină cont de faptul că durata de contact este scurtă la viteze mari, ceea ce duce la scăderea forței de frecare. În domeniul intermediar de viteze, toți factorii discutați anterior sunt în competiție, apariția unui maxim în curba forță-viteză de alunecare depinzând de proprietățile de relaxare ale polimerului. Trebuie spus că relația dintre forța de frecare și viteza de alunecare depinde de temperatură. Dacă testele sunt făcute aproape de temperatura de transformare de fază, viteza de alunecare are un efect pronunțat asupra frecării, pe când la temperatură scăzută frecarea este foarte puțin influențată de viteza de alunecare (Myshkin și colab., 2005).

Tabelul 5.2 Scurt istoric al influenței vitezei de alunecare asupra frecării (Myshkin și colab., 2005)

Material și viteza de alunecare	Reprezentare grafică	Autorii cercetărilor
0,01 – 1 cm/s, oțel – polimer (PTFE, PE, PMMA, PS)		Shooter și Thomas (Myshkin și colab., 2005)
4 – 183 cm/s, polimer – polimer (1 – nylon, 2 – PS)		Milz și Sargent (Myshkin și colab., 2005)
10 ⁻⁵ – 10 cm/s, oțel – polimer (PTFE)		Fort (Myshkin și colab., 2005)
0,1 – 10 cm/s, oțel – polimer (1 – PTFE, 2 - nylon)		White (Myshkin și colab., 2005)
1,1 – 180 cm/s, oțel – polimer (PTFE)		Flom și Porile (Myshkin și colab., 2005)
1,5 cm/s, polimer – polimer (fibre)		Oloffson și Gralben (Myshkin și colab., 2005)
Teoretic, oțel - cauciuc		Schallmach Bartenev și Lavrentev (Myshkin și colab., 2005)

În general, la creșterea vitezei de alunecare coeficientul de frecare crește (Yamaguchi, 1990). În figura 5.10 este prezentată variația coeficientului de frecare cu viteza de alunecare pentru cupla de frecare formată din oțel și nylon. Se observă că de la viteza de 0,1 m/s la viteza de 10 m/s coeficientul de frecare are o creștere continuă. Pe baza variațiilor coeficientului de frecare cu viteza prezentate în figura 1.10, Yamaguchi stabilește o relație de forma:

$$\mu = c \cdot v^\beta \quad (1.10)$$

unde exponentul β variază în funcție de polimer, având valori cuprinse între 0,05 și 0,18 (Yamaguchi, 1990).

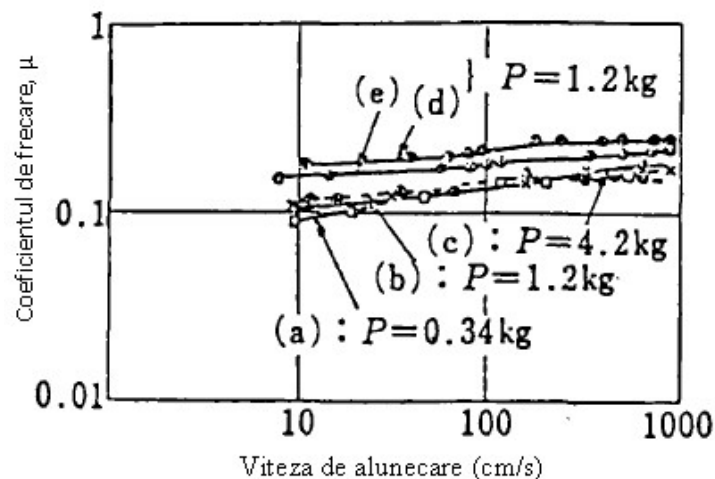


Figura 5.10 Variația coeficientului de frecare în funcție de viteza de alunecare pentru frecarea de alunecare în cupla de tip oțel – nylon la diverse încărcări (Yamaguchi, 1990)

Chowdhury și colaboratorii (2013) obțin prin teste de tip pin-disc creșteri ale coeficientului de frecare cu viteza pentru structuri complexe de polimeri cu inserție de fibră de sticlă. În figura 5.11 sunt prezentate o serie de diagrame obținute pentru sarcina de 15 N, la viteze de alunecare de 1 m/s, 1,5 m/s și 2 m/s. Se observă creșteri de până la 50% a coeficientului de frecare odată cu creșterea vitezei de alunecare de la 1 m/s la 2 m/s.

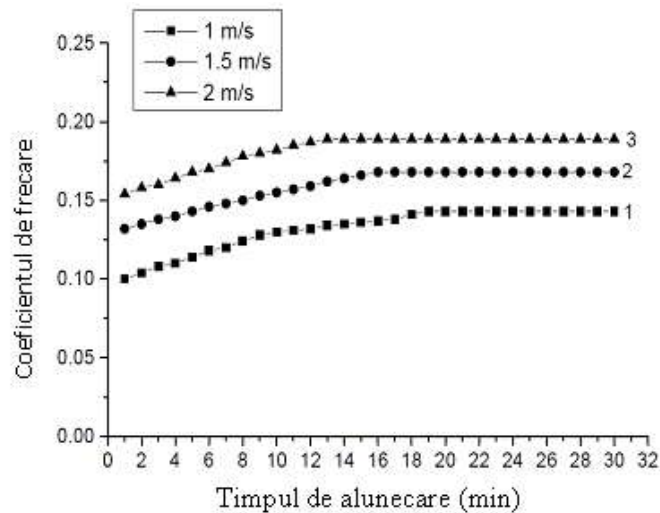


Figura 5.11 Variația coeficientului de frecare în funcție de viteză la încărcarea de 15 N pentru polimer cu inserție de fibră de sticlă (Chowdhury și colab., 2013)

O serie de cercetări efectuate de Li și colaboratorii (2011) pe un microtribometru pin-disc, cu vârful pinului sferic din oțel iar cu discul din elastomer PDMS (polidimetilsiloxan), au pus în evidență o importantă scădere a coeficientului de frecare în jurul vitezei de 60 mm/s după care coeficientul de frecare practic nu mai variază cu viteza până la 200 mm/s (Figura 5.12).

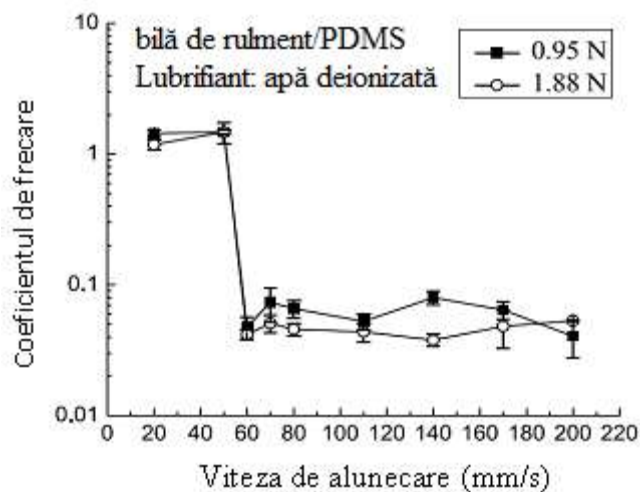


Figura 5.12 Variația coeficientului de frecare pentru PDMS la alunecarea în contact cu o bilă de oțel (Jinfeng Li și colab., 2011)

Creșteri ale forței de de frecare într-un tribosistem de tip rolă din oțel – rolă din polimer cu rostogolire și alunecare sunt raportate și de Sukumaran și colaboratorii (2015), așa cum se poate vedea în figura 5.13.

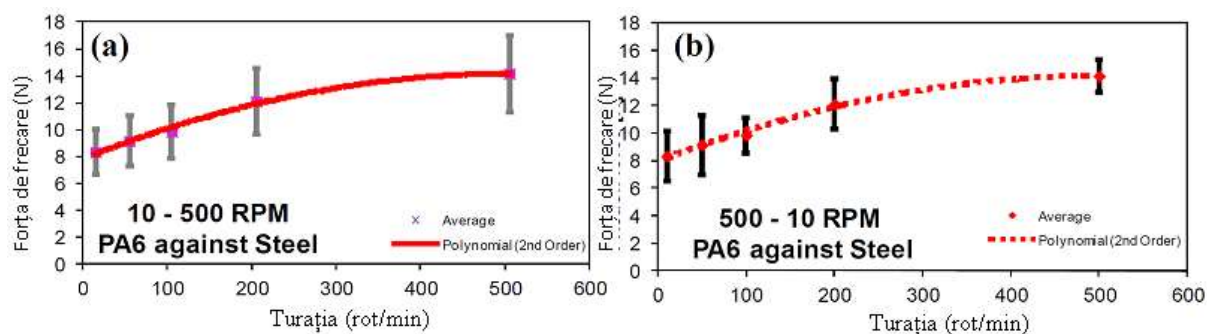


Figura 5.13 Variația forței de frecare la o încărcare de 210N; (a) la creșterea turației de la 10 rpm la 500 rpm, (b) la scăderea turației de la 500 rpm la 10 rpm (Sukumaran și colab., 2015)

5.2.7 Efectul temperaturii asupra frecării

Polimerii, ca materiale vâscoelastice, sunt foarte sensibili la încălzirea prin frecare. Se cunoaște faptul că frecarea este un proces disipativ în care energia mecanică este transformată în căldură. Starea termică a contactului de frecare este adesea un factor decisiv când evaluăm performanțele de fricțiune. Anumite procese cu mecanism molecular legate de transformarea energiei mecanice în căldură pot avea loc prin intermediul deformației plastice, histerezisului, dispersiei și curgerii vâscoase. O altă sursă de căldură poate fi atribuită ruperii legăturilor de adeziune. Aceste procese sunt cel mai probabil non-echivalente din punct de vedere energetic, iar diferența de energie poate duce la generarea sau absorbția de căldură (Myshkin și colab., 2005).

Adesea se crede că efectul temperaturii asupra frecării poate fi luat în calcul folosind caracteristicile mecanice ale polimerilor măsurate la diferite temperaturi. Pentru a întări această afirmație, anumiți autori (Vinogradov și colab., 1970; Ludema și Tabor, 1966) au corelat coeficientul de frecare cu duritatea și rezistența la forfecare pentru anumiți polimeri.

Mecanismul de bază al frecării polimerilor foarte elastici cu o suprafață fină este adeziunea. Un alt mecanism de frecare apare atunci când un polimer trece din starea elastică în starea vitroasă. Pierderile mecanice contribuie mult la revenirea stratului de polimer de la suprafață; componenta mecanică de volum contribuie mai mult atunci când polimerul este încălzit aproape de temperatura de tranziție vitroasă T_g , până când devine comparabilă cu contribuția adeziunii. Aceste aspecte au fost observate la polimerii amorf și cauciucuri dar și la polimerii cristalini (Myshkin și colab., 2005). Un studiu complex recent privind corelația temperatură frecare pentru polimeri este realizat de (Tzanakis și colab. 2013).

5.3 Comportarea la uzură a polimerilor

Procesul de uzură într-un contact cu alunecare poate fi definit în multe moduri (adeziune, abraziune, smulgeri de material, deformații plastice, coroziune etc.) În general, uzura este estimată din punct de vedere cantitativ prin pierderea de masă sau volum. Forțele mecanice, lucrul mecanic de frecare, forțele de impact, tensiunea de oboseală de contact, forțele de cavitație și așa mai departe, produc degradare între corpurile aflate în contact. În cele din urmă, sau chiar imediat, se pot produce degradări ale suprafețelor prin îndepărtare mecanică de material. Uzura chimică are un caracter similar dar la o scară mai mică. Ulterior, particulele de uzură sunt expulzate din zona de contact. Nu în ultimul rând, traseul uzurii se complică pentru că procesele de distrugere și uzură produc, prin acțiunea lor, modificări semnificative ale proprietăților materialelor în zona de contact (Briscoe și Sinha, 2002).

La scară generică uzura este, ca primă aproximare, de două feluri: interfacială și coezivă (în masă). Pe măsură ce lucrul mecanic de frecare cauzează distrugereri și uzură ulterioară, se poate face o clasificare în uzură coezivă și interfacială. O abordare mai pragmatică urmează o linie mai clasică și clasifică procesele de uzură judecând originea și consecințele ei. Astfel, din punct de vedere fenomenologic uzura poate fi abrazivă, uzură de transfer, fretting, uzură chimică, eroziune, uzură de oboseală, uzură prin delaminare și așa mai departe. Cea de-a treia abordare a fenomenului de uzură se referă la diversitatea extrem de largă de răspuns a polimerilor și se concentrează pe răspunsul materialului combinat cu deformația de contact predominantă. Figura 5.14 prezintă o clasificare a uzurii polimerilor din perspectiva celor trei abordări amintite mai înainte (Briscoe și Sinha, 2002).

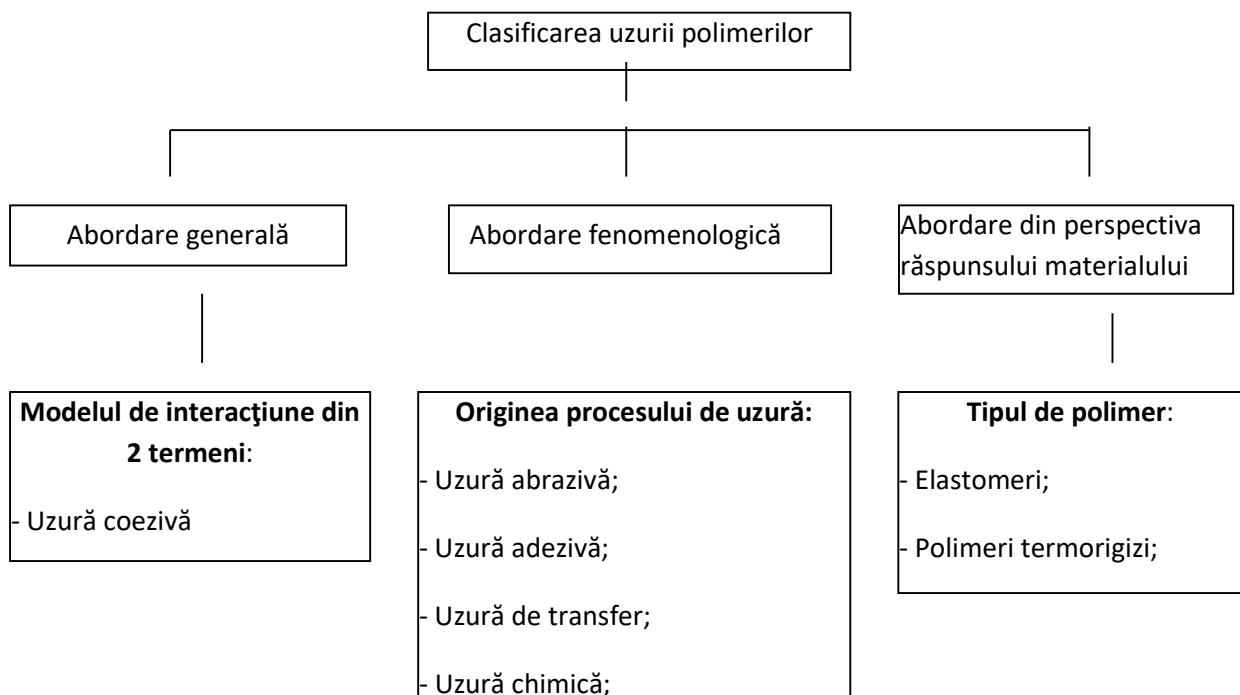


Figura 5.14 O clasificare simplificată a uzurii polimerilor (Briscoe și Sinha, 2002)

5.3.1 Uzura coezivă

O reprezentare schematică a uzurii coezive este dată în Figura 5.15. După cum se observă uzura coezivă se manifestă în zona de material, sub suprafața de contact în timp ce uzura interfacială se manifestă la suprafața de contact. Într-o primă fază are loc o disipare a energiei de frecare, apoi urmează distrugerea și uzura efectivă. Similar, aceleași etape se aplică și în cazul uzurii interfaciale. Această divizare a uzurii în coezivă și interfacială are unele lipsuri în aplicarea sa în anumite aspecte ale proceselor inginerești, și mai ales în domeniile de investigare detaliată a uzurii polimerilor în condiții de lubrificație. Clasificarea din perspectiva modelului cu 2 termeni (uzură coezivă și uzură interfacială) are unele avantaje în sensul că se face distincția clară între deformațiile de adâncime din cadrul uzurii coezive și consumul intens de energie în uzura interfacială. În cazul uzurii interfaciale energia este disipată în special prin interacțiunile adezive, în timp ce pentru uzura coezivă energia este disipată de interacțiunile adezive și abrazive (sub suprafață) (Briscoe și Sinha, 2002).

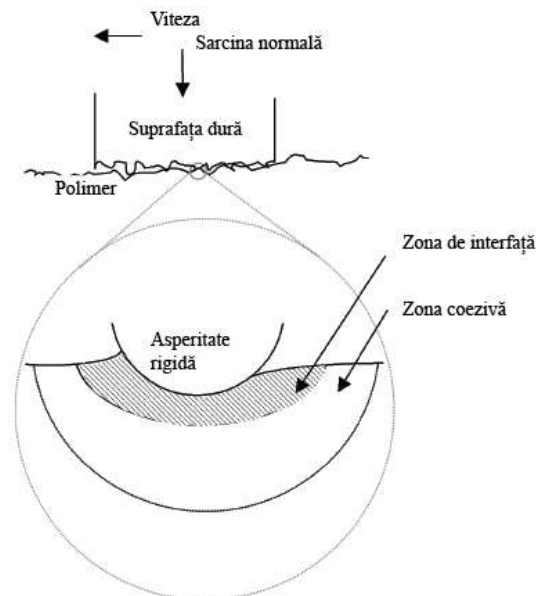


Figura 5.15 Modelul din doi termeni al procesului de uzură (Briscoe și Sinha, 2002)

5.3.2 Uzura interfacială

Acest tip de uzură cuprinde cealaltă parte a modelului cu doi termeni, și anume, acele moduri care încă nu se corelează în totalitate cu proprietățile de distrugere în masă. Prima chestiune este legată de modurile de distrugere și dacă distrugerea, prin transfer, este izotermă sau nu. Apoi, se pune problema consecinței comportamentului interfacial de forfecare cvasi-adiabatic. Figura 5.16 ilustrează schematic problematica uzurii interfaciale. Unii polimeri prezintă înmuiere prin forfecare la interfața izotermică; practic, la interfață are loc o reordonare a structurii polimerului în contact. Frecarea este de obicei foarte scăzută iar rata de transfer, și deasemenea uzură ulterioară, ar putea fi prolifică (Briscoe și Sinha, 2002).

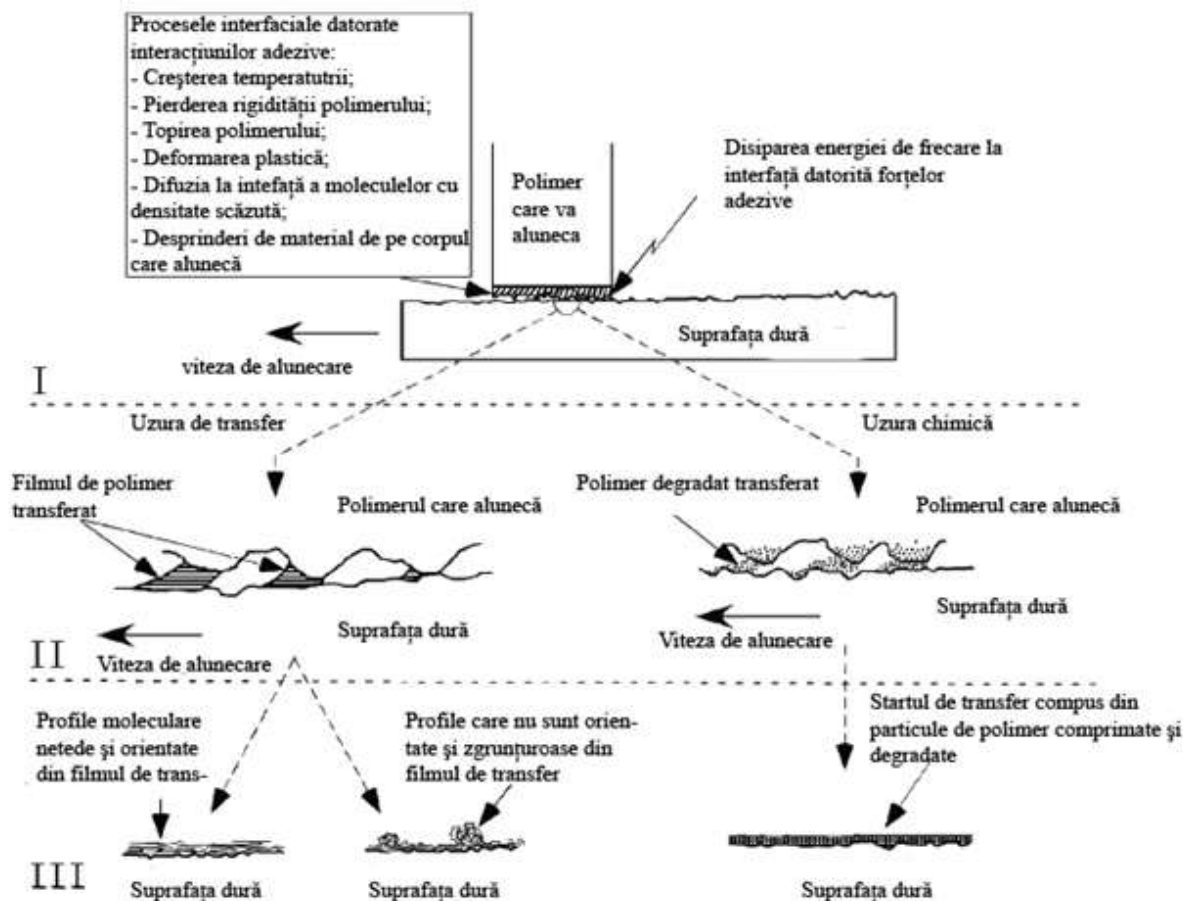


Figura 5.16 Descriere schematică a procesului de uzură interfacială. I Contactul inițial dintre două suprafețe. II Procesul de uzură în care moleculele de polimer deformabile sunt transferate treptat pe suprafața dură, formând un al treilea corp. III Starea stabilă a procesului de uzură în care uzură și frecarea sunt influențate în principal de forfecare și de proprietățile adezive ale filmului transferat (Briscoe și Sinha, 2002)

Cazurile adiabatice sunt împărțite pe două clase de polimeri, și anume polimeri cristalini (nereticulați) și polimeri reticulați, care includ elastomerii și polimerii termorigizi. Polimerii termorigizi sunt des utilizați în cuple de frânare și de tracțiune, pe când elastomerii au aplicabilitate largă în industria anvelopelor. În ambele cazuri există posibilitatea unei degradări chimice semnificative și a unei scindări a lanțurilor moleculare. Straturile de transfer, în cazul în care ele apar, nu sunt legate imediat de compoziția chimică sau fizică a polimerului gazdă. Materialul de transfer nu corespunde cu polimerul ci mai degrabă cu o formă degradată a acestuia. În practică acest caz nu conduce în mod natural la o înmuiere prin forfecare la interfață și la o reducere a frecării. Totuși, straturile de transfer vor împiedica în mod natural procesul de transfer de căldură, care este o consecință importantă în sistemele de frânare (Briscoe și Sinha, 2002).

5.3.3 Uzura abrazivă

Aspectul cheie al uzurii abrazive se referă la înlăturarea stratului de la suprafață de către particulele aflate în zona de contact sau asperitățile/rugozitățile suprafeței mai dure.

Abraziunea se prezintă ca zgârâieturi, scobituri și urme pe suprafața uzată, precum și resturi produse de abraziune care au adesea aspect de șanturi fine similare cu acelea produse în timpul prelucrării, deși la o scară mult mai fină. Cele mai multe modele asociate uzurii abrazive includ descrieri geometrice ale asperităților, astfel încât ratele de uzură se dovedesc a fi destul de influențate de forma și unghiul la vârf al asperităților care se deplasează pe suprafață. Sursele abrazive sunt numeroase iar uzura abrazivă pentru un anumit tribosistem va depinde într-o oarecare măsură de modul în care particulele abrazive intră în tribosistem: dacă acestea sunt prezente în microstructura materialului ca fază dură, intrarea în sistem a contaminanților din afară, sau generarea ca resturi de uzură între suprafețele în contact (Myshkin și colab., 2005).

Există două moduri de deformare atunci când o particulă abrazivă intră în contact cu un material plastic. Primul mod se referă la formarea de canale în materialul plastic, numite și brazde, când înaintea particulei se regăsește material ce este împins în lateral formând muchiile canalului. În acest caz nu este îndepărtat material. Al doilea mod se referă la tăierea materialului, similar cu microprelucrarea în care tot materialul deplasat de particulă este înlăturat.

Experimentele au arătat că rata de uzură abrazivă este proporțională cu $1/\sigma_u \epsilon_u$, unde σ_u este rezistența la rupere iar ϵ_u este deformația corespunzătoare (Figura 5.17) (Myshkin și colab., 2005).

Într-o abraziune fără desprinderi, unele asperități produc șanturi iar altele tăieturi, în funcție de doi factori: unghiul de atac al particulei și rezistența la forfecare interfacială ca raport dintre tensiunea de forfecare la interfață și tensiunea de curgere la care materialul trece în zona deformațiilor plastice. În cazul abraziunii cu desprinderi, particulele abrazive libere penetrează suprafața polimerică care începe să funcționeze ca o pânză abrazivă ducând la creșterea uzurii.

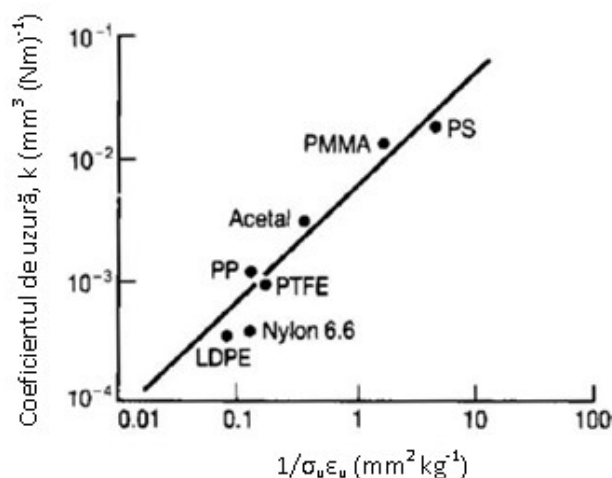


Figura 5.17 Corelarea Ratner-Lancaster pentru abraziune (Myshkin și colab., 2005)

5.3.4 Uzura adezivă și de transfer

Uzura adezivă rezultă din forfecarea jocțiunilor de frecare. Mecanismul fundamental al acestei uzuri este adeziunea, o componentă importantă a frecării. Acest proces evoluează prin formarea jocțiunii de adeziune, creșterea și apoi ruperea ei. O trăsătură a acestei uzuri este că transferul de material de la o suprafață la alta apare datorită legăturii localizate dintre suprafețele solide în contact. Transferul de polimer este cea mai importantă caracteristică în uzura adezivă a polimerilor. Trebuie menționat că uzura adezivă însoțește celelalte procese de uzură (de oboseală, de abraziune etc.).

Uzura de transfer prin frecare se regăsește la toate tipurile de materiale (metale, materiale ceramice și polimeri) și combinațiile lor. Ideea este dacă transferul are influențe asupra comportamentului tribologic a suprafețelor care se freacă. Din acest punct de vedere, consecințele transferului de material pot fi foarte diferite. Dacă particule mici de ordinul micronilor sunt transferate de la o suprafață la alta, atunci rata de uzură variază puțin. Însă, în anumite situații un film subțire de material moale este transferat pe suprafața mai dură, de exemplu polimer pe metal. Dacă filmul de polimer transferat este eliminat de pe suprafața oțelului, rata de uzură va crește. În cazul în care filmul este ținut pe suprafață, apare frecarea între două materiale similare care poate duce la gripaj. Răspândirea polimerului pe suprafața de oțel duce la salturi mari ale forței de frecare, însă uzura este semnificativă.

În anumite condiții se poate întâmpla ca materialul mai dur să fie transferat în materialul mai moale. De exemplu, bronzul este transferat pe polimer. Particulele dure transferate sunt înglobate în materialul mai moale și servesc ca particule abrazive, care zgârâie materialul de bază. Totuși, polimerii sunt cei mai sensibili la transferul prin frecare atunci când sunt în contact cu materiale dure. Fragmentul de polimer transferat poate avea diverse forme în funcție de proprietățile polimerului și condițiile de frecare. De exemplu, în cazul ideal se observă particule sferice în timpul uzurii adezive. O altă consecință a transferului de polimer este modificarea rugozității ambelor suprafețe aflate în contact. Rugozitatea polimerului suferă variații mari în timpul uzurii până când se ajunge la o uzură stabilă, în timp ce rugozitatea metalului se modifică datorită transferului de polimer (Myshkin și colab., 2005).

5.3.5 Uzura de oboseală

Oboseala este cunoscută ca modificarea stării unui material datorită solicitărilor repetate (ciclice) care duc în final la rupere. Trăsătura caracteristică a oboselei este acumularea de modificări ireversibile în material, care conduc la generarea și dezvoltarea de fisuri. Procese similare au loc și în cazul frecării care însoțește aproape toate modurile de uzură. Este vorba despre contactul cu frecare de rotație și de alunecare cu încărcare ciclică. În plus, fiecare asperitate care intervine în frecare suferă o încărcare secvențială datorită asperităților suprafeței cu care intră în contact. Ca o consecință, se formează două câmpuri de tensiune, unul la suprafața și unul în imediata vecinătate, de mărimi diferite. Aceste câmpuri de tensiune sunt responsabile pentru oboseala materialului în acele regiuni, ceea ce

duce la generarea și propagarea fisurilor și formarea de particule de uzură. Acest proces este numit uzură de oboseală.

Se știe că fisurile de oboseală apar în punctele în care tensiunea tangențială sau alungirea sunt maxime. Studiile teoretice și experimentale arată că în contact poziția tensiunii tangențiale maxime depinde de coeficientul de frecare. La coeficienți de frecare mici, punctul în care tensiunea tangențială este maximă se află imediat sub suprafață ($\mu < 0,3$). Atunci când coeficientul de frecare crește ($\mu > 0,3$) punctul se află la suprafață. Pe de altă parte, dacă un corp solid este supus la încărcări combinate normale și tangențiale, punctele de tensiune maximă se regăsesc acolo unde există alungire și încălzirea prin frecare. Astfel, fisurile pot nuclea la suprafață sau în imediata vecinătate a acesteia. Inițierea fisurilor de oboseală este acompaniată de defecte, care sunt responsabile de concentratorii de tensiune. Acestea sunt zgârâieturi, urme de lovituri și gropi la suprafață, și impurități, goluri și cavități în substrat. Ambele fisuri de suprafață și din vecinătatea acesteia care se deschid datorită solicitării repetate, vor crește treptat, se vor uni și se vor intersecta între ele și vor ajunge la suprafață până apar reziduri de uzură, care vor fi eliminate după un anumit număr de cicluri de solicitare (Myshkin și colab., 2005).

5.3.6 Uzura elastomerilor

Subiectul uzurii elastomerilor a evoluat mai degrabă separat de cel al uzurii polimerilor. O analiza complexă a uzurii elastomerilor este făcută de către Briscoe și Sinha (Briscoe și Sinha, 2002). În figura 5.18 sunt prezentate schematic fazele de uzură pentru un elastomer în contact cu un vârf de rugozitate. În fig. 1.18 semnificațiile fazelor sunt următoarele:

(a) Urma de deformare când un indenter neted sau conic va aluneca pe suprafața elastomerului. Suprafața elastomerului este trasă în direcția mișcării și cedează la o anumită tensiune critică.

(b) După ce indenterul sare în față, suprafața se relaxează și rupturile la tracțiune sunt evidențiate pe suprafață, pe direcția mișcării.

(c) Ruperea unui elastomer datorită efortului de tracțiune cu un indenter mare, nelubrifiat. Ruptura este generată în spatele ariei de contact și este realizată la unghiuri drepte pe direcția mișcării.

(d) În următoarea fază se formează o serie de margini ridicate a elastomerului dar nu este îndepărtat nici un material.

(e) Un profil tipic al forței de frecare/forței de indentare când un corp este supus alunecării peste un elastomer îl reprezintă fenomenul de „stick-slip” cu creșteri și scăderi succesive ale forței de frecare (Briscoe și Sinha, 2002; Deladi, 2006).

Alunecare unidirecțională produce obișnuită urmă de abraziune, deseori vizibilă pe suprafețele nealiniat ale cauciucurilor automobilelor. Secțiune normală la suprafețele uzate prezintă structuri cuticulare care seamănă cu țigla de pe acoperișuri.

Unii autori au încercat să modeleze acest proces folosind lame de metal în contact cu discuri de cauciuc.

Ratele uzurii sunt în general mai mari decât în cazul unidirecțional, în același condiții comparabile (Briscoe și Sinha, 2002).

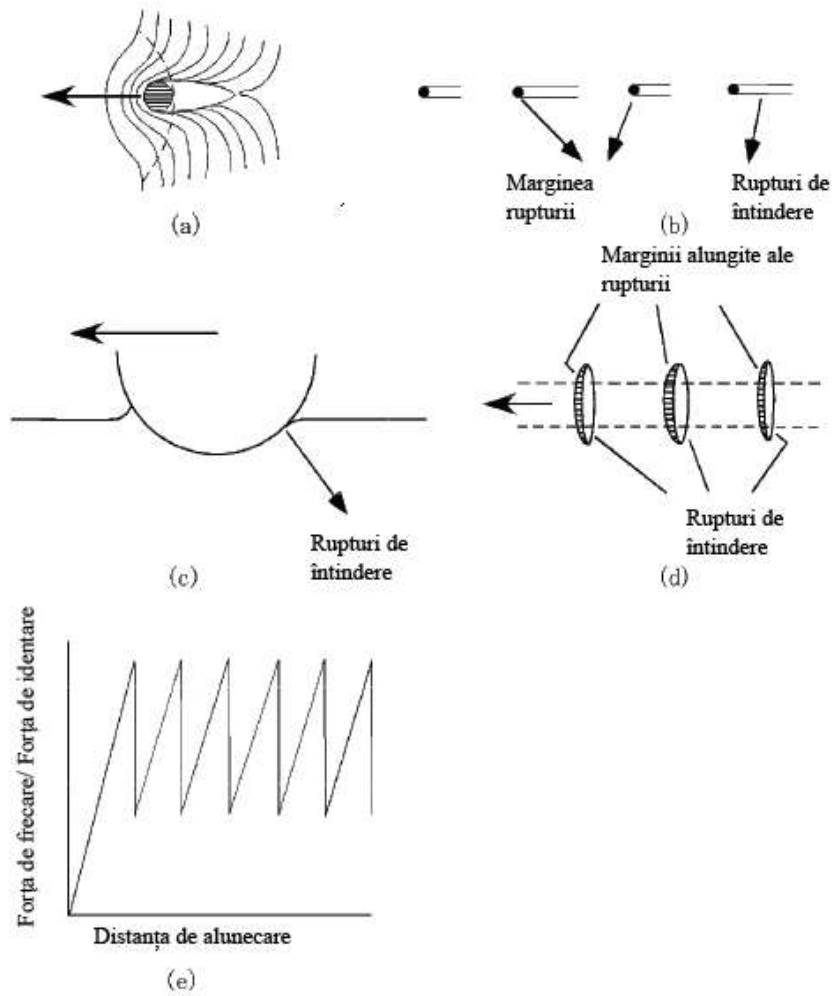


Figura 5.18 Schema de uzură a unui elastomer sugerată de Briscoe și Sinha (2002)

6. METODE ȘI ECHIPAMENTE UTILIZATE ÎN TESTAREA TRIBOLOGICĂ A POLIMERILOR

Răspândirea pe scară tot mai largă a sistemelor tribologice de tip polimer-metal în industria constructoare de mașini și nu numai, se datorează valorilor mai scăzute ale coeficientului de frecare (unii polimeri fiind materiale antifricțiune, adică materiale care asigură coeficienți de frecare mai mici decât 0,1 în condiții uscate), rezistenței la uzură, greutate specifică mult mai mică decât a metalelor, posibilități de execuție prin turnare mai simple decât la metale, izolare electrică a componentelor în contact etc. Datorită utilizării tot mai intense a materialelor polimerice pentru înlocuirea unor tribosisteme clasice în industrie, s-a impus necesitatea dezvoltării de metode pentru cercetarea caracteristicilor tribologice ale polimerilor.

Încă de la mijlocul secolului trecut atenția cercetătorilor a fost atrasă asupra potențialului tribologic al acestor materiale. Astfel, Bartenev și Lavrentev (1981) prezintă în cartea lor diverse echipamente și metode pentru testarea la frecare și uzură a diversilor polimeri, de la dispozitive simple mecanice până la dispozitive mai complexe, bazate pe determinări de forțe de frecare cu mărci tensometrice, în diverse condiții de temperatură, presiune și umiditate. În esență dispozitivele folosite au la bază frecarea de alunecare între diverse tribosisteme de tip plan-plan, pin-disc, rolă-disc, sabot-disc, masină cu 4 bile etc.

Cercetări recente, utilizând tribometre moderne cu achiziții și prelucrare de date pe calculator au putut să pună în evidență fenomenele complexe ale frecării în tribosisteme de alunecare în care cel puțin una din suprafețe este realizată dintr-un polimer.

6.1 Metoda de testare cu bilă-disc

În esență, metoda utilizează un pin cu cap sferic sau cu suprafață plană în contact cu un disc rotitor sau cu o masă aflată în mișcare de translație. În general vârful sferic al pinului este constituit din bile de oțel de rulment cu rugozități $R_a=(0.03 - 0.06) \mu\text{m}$ iar suprafața plană este din polimer.

Jian (2009) efectuează un studiu despre comportarea la frecare și uzură a fluorurii de poliviniliden (PVDF) și a PVDF armate cu fibre de carbon în diverse procente, în condiții de alunecare. Studiile de frecare și de uzură au fost efectuate folosindu-se un tribosistem bilă-epruvetă plană de polimer. Testele au fost efectuate pe un tribometrul UMT-2MT la temperatura camerei cu umiditate relativă 30-45%. Reprezentarea schematică a tribosistemului este dată în figura 6.1, forța de apăsare fiind de 9N iar frecvența ciclurilor de mișcare liniară a mesei cu epruveta a fost de 4 Hz.

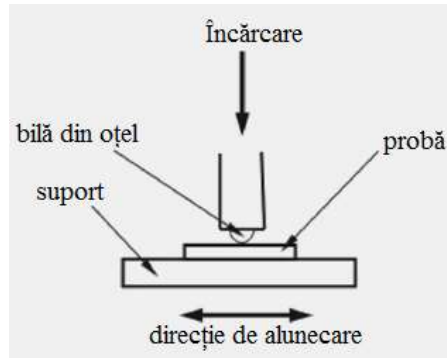


Figura 6.1 Reprezentare schematică a tribosistemului bilă-plan (Jian, 2009)

O serie de rezultate privind coeficientul de frecare în funcție de durata încercării sunt prezentate în Figura 6.2-a pentru polimerul PVDF fără fibră de carbon și în Figura 6.2-b pentru polimerul PVDF cu fibră de carbon în procent de 10%.

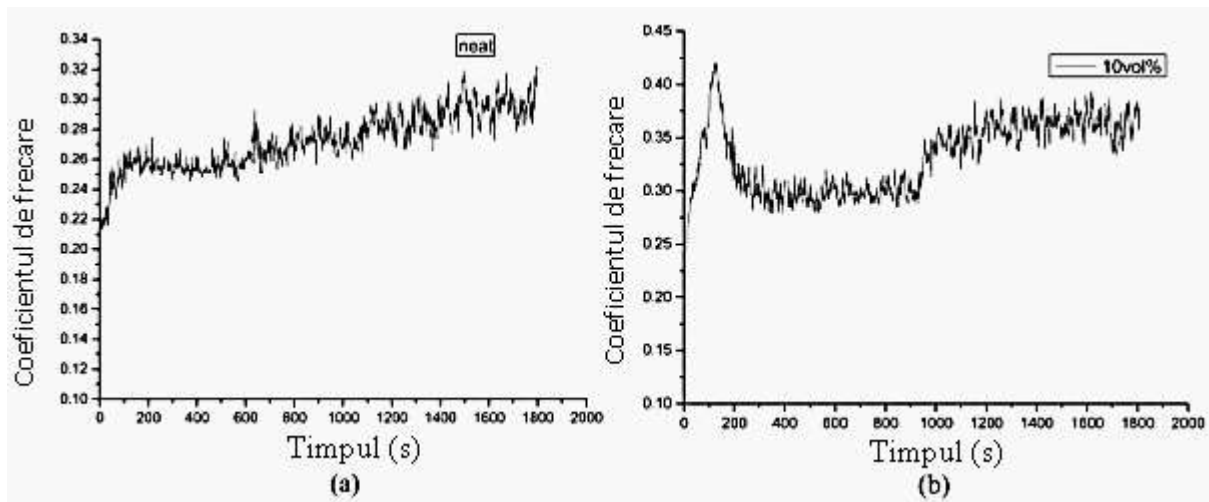


Figura 6.2 Rezultate ale coeficientului de frecare în mișcare de alunecare ciclică dintre o bilă de oțel și o probă plană de polimer PDVF (Jian, 2009)

Teste similare cu diverse forțe de apăsare între 6 N și 15 N au pus în evidență creșteri ale coeficientului de frecare odată cu creșterea încărcării și scăderi ale coeficientului de frecare la creșterea procentului de fibră de carbon până la 30%, Figura 6.3.

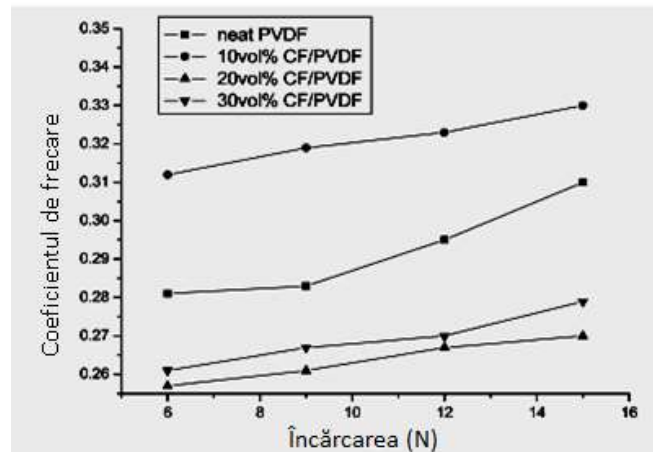


Figura 6.3 Variația coeficientului de frecare în funcție de încărcare și de procentul de fibră de carbon adăugată în polimerul PVDF (Jian, 2009)

Zhou și colab. (2014) studiază comportamentul poliamidei PA6 îmbunătățită cu poliuretan termoplastic (TPU) în diverse procente. Testele efectuate pentru studiul frecării și al uzării au fost realizate pe tribometru pin –disc. Pinul are atașat în capăt o bilă din oțel de rulment cu diametrul de 6 mm iar probele de polimer au diametrul de 25 mm și grosimea de 2 mm. Încărcările aplicate au fost de 5 N și 10 N la viteze de rotație a discului de 500 rot/min și respectiv 1000 rot/min. Durata testelor a fost cuprinsă între 0 și 40 min. Testele pun în evidență o reducere importantă a coeficientului de frecare în raport cu gradul de aditivare cu poliuretan termoplastic (TPU) (Figura 6.4).

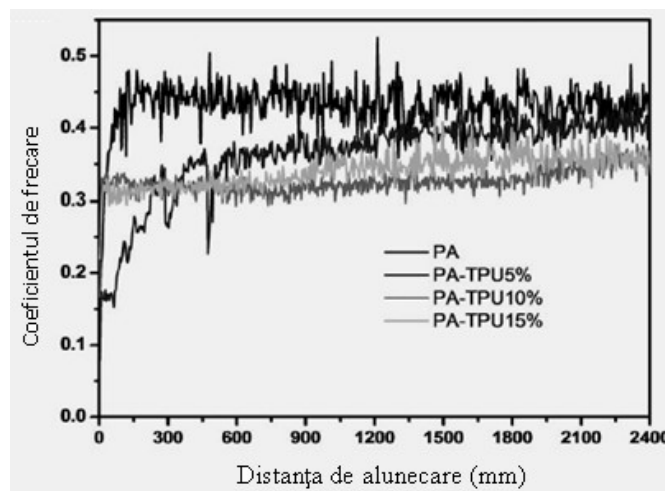


Figura 6.4 Variația coeficientului de frecare în funcție de timpul de alunecare la o încărcare normală de 5 N și o viteză de 500 rot/min pentru poliamidă PA6 cu diverse procente de poliuretan (Zhou și colab., 2014)

Teste privind comportarea la frecare utilizând un tribosistem pin - disc au fost efectuate și de către Li J. și colaboratorii (2011). Materialele testate au fost: pentru disc, PDMS (polidimetilsiloxan) cu diametrul de 36 mm și o grosime de 5 mm, iar pentru pin s-a utilizat o bilă de rulment cu diametrul de 8 mm și o duritate cuprinsă

între 62 și 66 HRC, rugozitatea suprafeței bilei a fost de $0,025\ \mu\text{m}$. Reprezentarea schematică a condițiilor de contact bilă – disc se regăsește în figura 6.5.

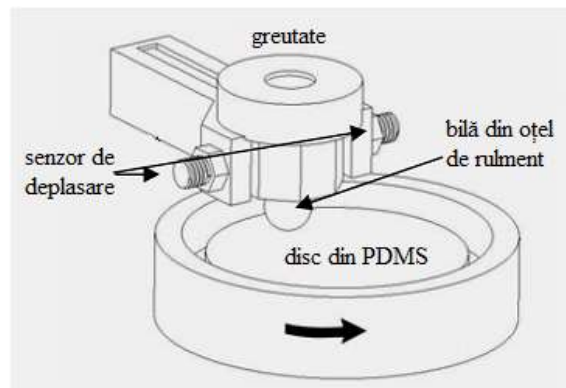


Figura 6.5 Reprezentare schematică a testului de frecare cu tribometrul pin-disc dintre PDMS și bila de rulment (Li J. și colab., 2011)

Sarcina se aplică pe bilă prin motarea de greutateți pe platoul superior. Testele s-au realizat în condiții de lubrifiere cu apa deionizată și aplicând o forță normală de $0,95\ \text{N}$ și $1,88\ \text{N}$ la o viteză tangențială la nivelul contactului cuprinsă în domeniul (20-200) mm/s. Toate probele analizate au parcurs o distanță de inițială de rodaj de 2 m, iar media rezultatelor obținute după parcurgerea următorului metru a fost luată în considerare ca valori pentru coeficientul de frecare. Raza de contact dintre bilă și polimer precum și presiunea de contact s-au calculat cu relația lui Hertz (Li J. și colab., 2011).

Testele au fost efectuate pe probe de PDMS netexturate precum și cu probe cu textură realizată prin micro orificii cu diametre cuprinse între $30\ \mu\text{m}$ și $500\ \mu\text{m}$ și o adâncime de $5\ \mu\text{m}$ în proporție de acoperire de 4,9% din suprafața discului. Rezultatele testelor efectuate de Li și colab. (2011) prezentate în figura 6.6 pun în evidență fluctuații importante ale coeficientului de frecare funcție de diametrele găurilor utilizate pentru realizarea texturării iar influența vitezei este practic nesemnificativă peste viteza de $60\ \text{mm/s}$. Este de remarcat în acest caz că prezența apei în cadrul testelor a jucat rolul unui lubrifiant cu efecte mai mult sau mai puțin importante în funcție de prezența acestor micro orificii realizate pe suprafața discului.

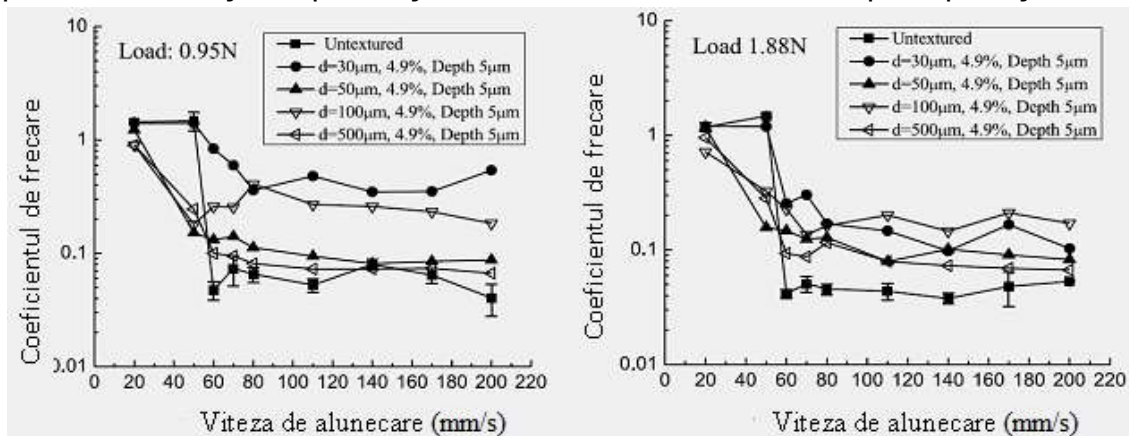


Figura 6.6 Variații ale coeficientului de frecare pentru polimerul tip PDMS texturat cu diferite diametre ale urmelor (Li J. și colab., 2011)

Verheyde și colaboratorii (2009) au utilizat metoda pin–disc pentru studiul frecării unor elastomeri acoperiți cu straturi subțiri de Poliamidă 11 care conține diverși aditivi. Schema de testare este prezentată în figura 6.7.

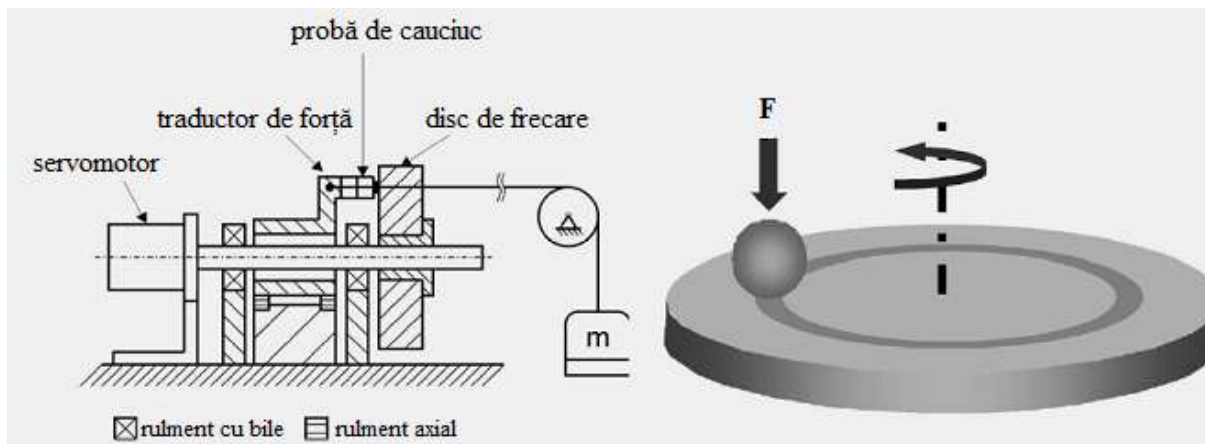


Figura 6.7 Stand tip bilă-disc pentru studiul comportării la frecare a unor straturi de Poliamidă 11 depuse pe disc din poliuretan termoplastic (Verheyde și colab., 2009)

Testările au fost efectuate cu bilă din oțel de rulment având diametrul de 5 mm, în contact cu diverse straturi de depunere pe un substrat din poliuretan termoplastic (TPU). Straturile de depunere conțin Polimer 11 cu aditivi din PTFE și MoS₂. În figura 6.8 sunt prezentate variații ale coeficientului de frecare pentru poliuretanul fără acoperire și pentru diverse acoperiri, coeficientul de frecare variind între 1,4 și 0,15.

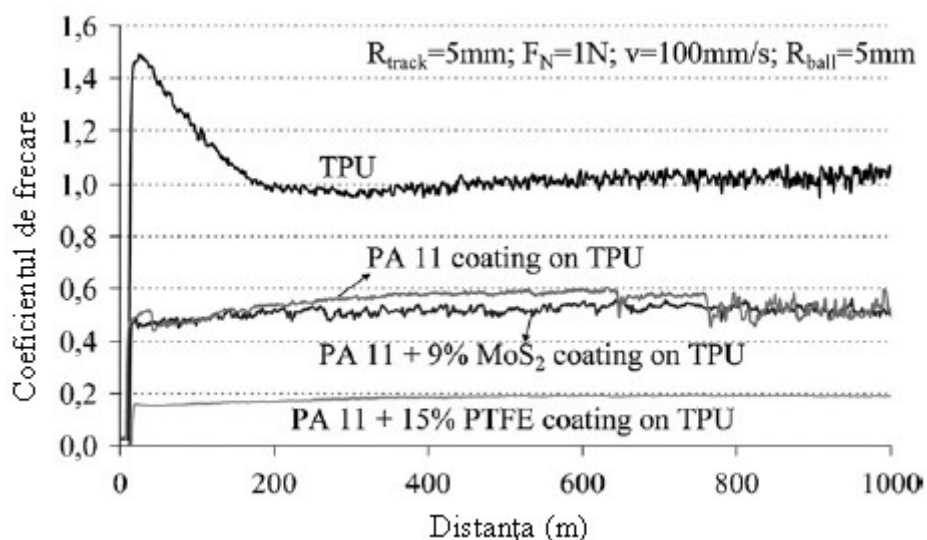


Figura 6.8 Variații ale coeficientului de frecare pentru poliuretanul TPU cu diverse acoperiri, prin testare de tip bilă-disc (Verheyde și colab., 2009)

Testări de tip pin-disc cu mișcare de translație au fost efectuate și de către Gustafsson (2013) utilizând un stand complex care, în esență se bazează pe tribosistemul de alunecare pin cu cap sferic pe suprafață plană, pinul fiind din

poliamidă și din oțel iar suprafața plană fiind realizată din diverse materiale polimerice. O prezentare generală a standului este dată în figura 6.9.

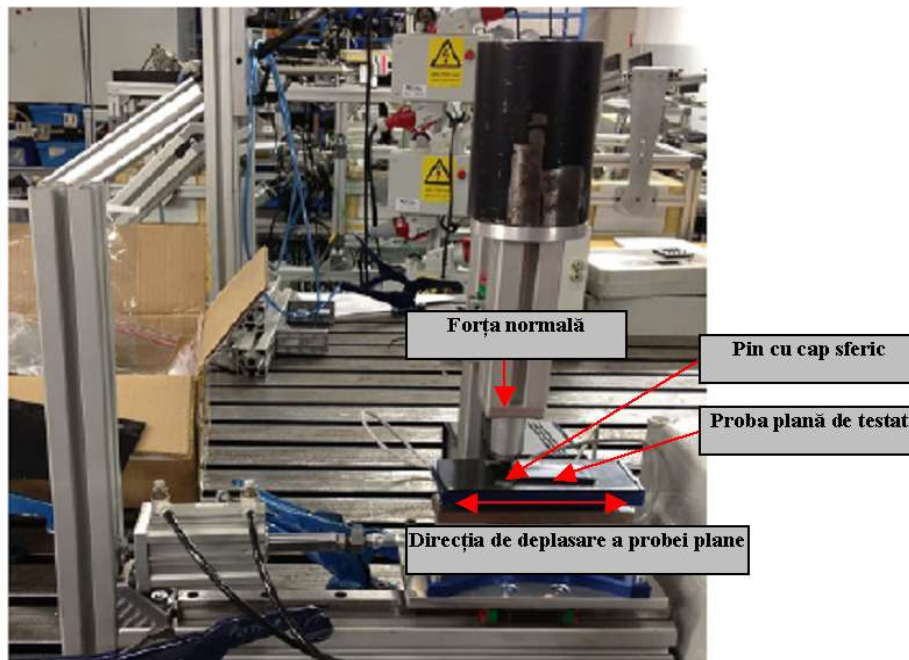


Figura 6.9 Prezentare generală a standului de testare la frecare a polimerilor (Gustafsson, 2013)

Testările au fost efectuate cu o încărcare normală a pinului în jur de 60 N, pe o cursă de 50 mm dus și întors, cu frecvențe variabile de până la 50 Hz. Testările au vizat comportarea la frecare pentru diverse variante de polimeri utilizați în construcția autovehiculelor. În figura 6.10 se prezintă diagrama de variație a forței normale cu oscilații în jurul valorii de 60 N și diagrama de variație a forței tangențiale cu variații între -10 N și $+10$ N, dar cu configurații diferite în sensul negativ față de sensul pozitiv. Totodată Gustafsson pune în evidență și variațiile mari între coeficientul de frecare static și cel dinamic, ca în figura 6.11.

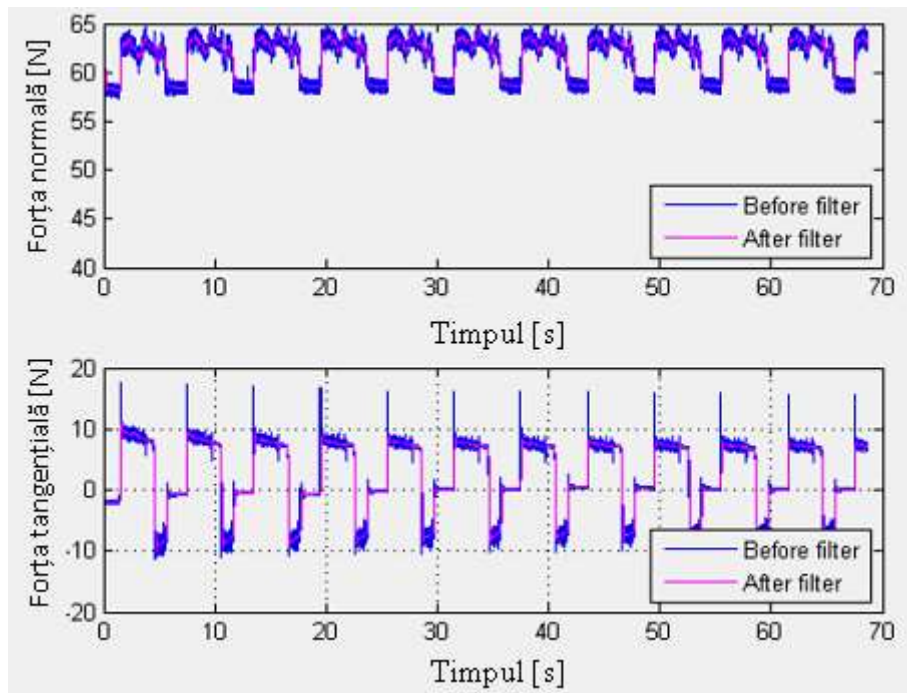


Figura 6.10 Variații ale forțelor de apăsare și de frecare raportate de Gustafsson (2013)

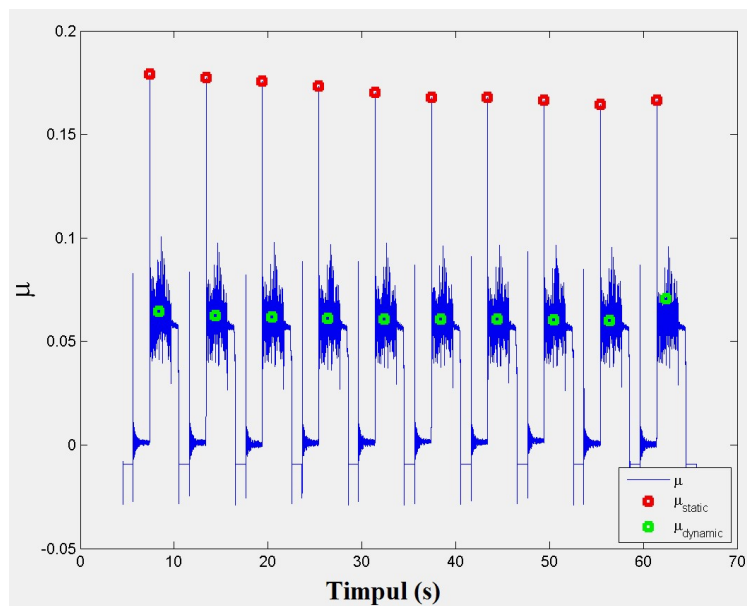


Figura 6.11 Variații ale coeficienților de frecare statici și dinamici raportate de Gustafsson (2013)

Diversitatea combinațiilor de polimeri cu diverse adaosuri de aditivi și tehnologii de realizare s-au reflectat și în variațiile mari ale coeficienților de frecare obținuți, de la 0,08 până la 0,4 pentru coeficienții de frecare dinamici, în timp ce la coeficienții de frecare statici plaja de valori variază de la 0,15 până la 0,5, așa cum se poate vedea în figura 6.12.

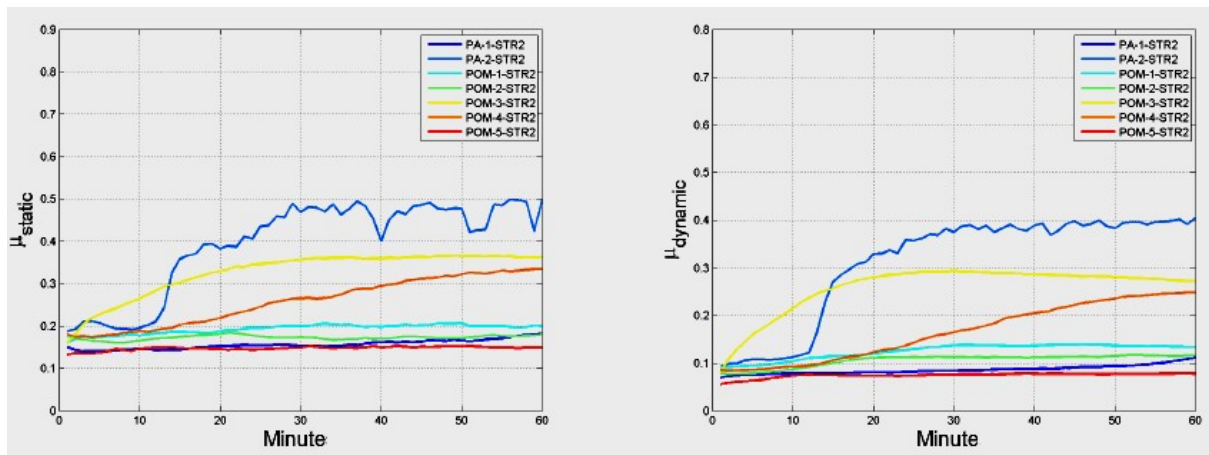


Figura 6.12 Variații ale coeficienților de frecare statici și dinamici pentru 7 variante de polimeri testate de către Gustafsson (2013)

Testarea diversilor polimeri cu tribometre de tip pin cu cap sferic (bilă) și suprafață plană de polimer ridică o serie de probleme, în special când polimerul are modulul de elasticitate scăzut. În esență, bila, sub acțiunea forței de apăsare imprimă o urmă în polimer iar atunci când are loc mișcarea de alunecare dintre bilă și polimer, forța tangențială are o componentă dată de adeziunea dintre bilă și polimer și o componentă dată de deformarea elastică sau elasto-plastică a polimerului. Haugstad și colaboratorii (1999) au analizat relația deformației dintre un pin cu vârf sferic de raza R și suprafața polimerului în funcție de sarcina aplicată, propunând un model conform figurii 6.13.

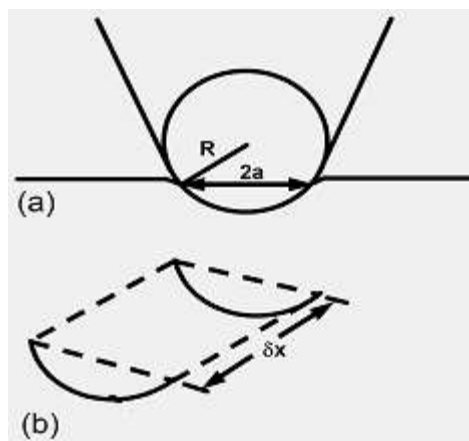


Figura 6.13 a) Ilustrare a indentării unui polimer cu un vârf sferic având raza de curbură R ; b) regiunea deformată sub formă de „șanț” lăsată de către vârful sferic de indentare (Haugstad G. și colab. 1999)

Aria urmei lăsată de vârful sferic în suprafața polimerului poate fi exprimată de relația propusă de Haugstad (1999):

$$A = R^2 \cdot \left[\arcsin\left(\frac{a}{R}\right) - \frac{a}{R} \cdot \sqrt{1 - \left[\frac{a}{R}\right]^2} \right] \quad (2.1)$$

unde a este raza cercului de contact dintre bilă și polimer stabilită pe baza relației lui Hertz. Trecerea unui vârf sferic pe suprafața unei probe duce la formarea unei regiuni sub forma unui șanț (Figura 2.13). Energie disipată pe unitatea de volum (δU) raportată la distanța elementară δx reprezintă forța de frecare F_f :

$$F_f = \frac{\delta U}{\delta x} \quad (2.2)$$

Energia disipată pe unitatea de volum poate fi exprimată ca $\delta U = E'' A \cdot \delta x$ unde E'' reprezintă pierderea modulului de elasticitate a polimerului prin deformare.

În aceste condiții, introducând expresia ariei de contact în funcție de raportul a/R Haugstad (1999) obține următoarea relație aproximativă a forței de frecare dintre care primul termen reprezintă aprox. 90% din totalul forței de frecare.

$$F_f = E'' R^2 \left[\frac{2}{3} \left(\frac{a}{R}\right)^3 + \frac{1}{5} \left(\frac{a}{R}\right)^5 - \frac{3}{28} \left(\frac{a}{R}\right)^7 + \dots \right] \quad (2.3)$$

O problemă importantă în cazul testării frecării cu bilă o reprezintă și corelația dintre viteza de deplasare a bilei și timpul de relaxare a urmei lăsată de bilă. Pot exista situații în care, la viteze mici urma să aibă timp să se refacă iar forța de frecare să cuprindă și componenta de deformare elastică. În caz contrar, dacă viteza crește, urma lăsată de bilă nu are timp să se refacă total sau parțial și în aceste condiții componenta de deformare elastică nu mai intervine în forța de frecare.

6.2 Metoda pin-disc

Chowdhury și colaboratorii (2013, 2014) au studiat frecarea și uzura materialelor plastice utilizând un tribometru original tip pin cilindric–disc. Tribosistemul utilizat este prezentat schematic în figura 6.14.

Parametrii utilizați în cadrul experimentului au fost: încărcare normală 10, 15, 20 N, viteza de alunecare 1, 1,5, 2 m/s, durata testării 30 de minute, starea suprafețelor – uscată, materialul discului testat la frecare: polimer cu inserție de fibră de sticlă cu rugozitate $R_a = (0,70 - 0,80) \mu\text{m}$, rugozitatea pe suprafața frontală plană a pinului de $R_a = 0,30 \mu\text{m}$ și $R_a = 3 \mu\text{m}$.

Chowdhury și colaboratorii (2013) raportează numeroase rezultate privind influența sarcinii și a vitezei asupra coeficientului de frecare. Cu acest tip de testare pin cilindric–disc, variațiile coeficientului de frecare cu sarcina și cu viteza păstrează regula generală specifică majorității polimerilor: coeficientul de frecare scade cu creșterea încărcării și crește cu creșterea vitezei.

Un alt fenomen specific observat la acest tip de testare constă în creșterea inițială a coeficienților de frecare în primele 15 – 20 de minute după care coeficienții de frecare rămân constanți (Figura 6.15), explicația fiind dată de stabilizarea termică în zona de contact.

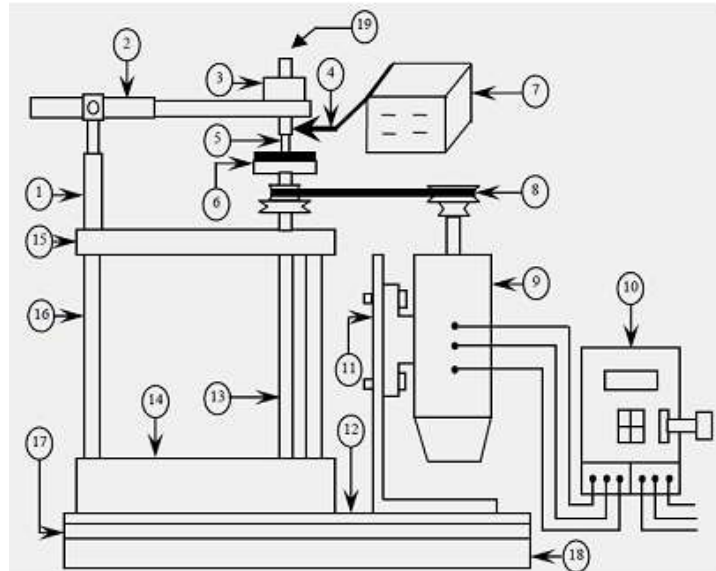


Figura 2.14 Schemă bloc a aparaturii de testare: 1- suport braț sarcină încărcare; 2 - braț sarcină; 3 - forța normală; 4- forța de frecare; 5 - pin cilindric din oțel; 6- discul de testare a polimerilor atașat pe masa rotativă; 7 - indicator sarcină; 8- curea și roată curea; 9 - motor; 10 - unitate de control a vitezei; 11- suport vertical motor; 12 - amortizor de cauciuc; 13 - arbore principal; 14 - suport de bază; 15 - placă de reazem pentru arbore; 16- bară verticală; 17 - placă bază din oțel; 18- bloc din cauciuc; 19 – suport pentru pin. (Chowdhury et al.,2013)

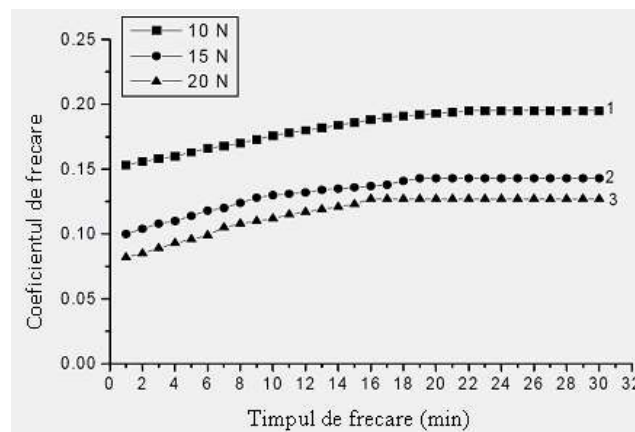


Figura 6.15 Variația coeficientului de frecare în timp pentru trei sarcini: 10 N, 15 N și 20 N la viteza de 1 m/s (Chowdhury și colab.,2013)

O altă metodă de testare la frecare de tip pin-disc constă în utilizarea unor pini din diverse materiale polimerice în contact cu discuri din oțel. Un asemenea test este raportat de Tongsheng și colaboratorii (2000) pe un tribometru prezentat schematic în figura 2.16. Astfel, utilizând un pin din polimer termoplasic cu diametrul de 5 mm și lungime de 18 mm în contact cu un disc rotativ din oțel inoxidabil cu diametrul de 45 mm, cu grosimea de 8 mm și cu o rugozitate $R_a=0,45 \mu\text{m}$, Tongsheng și colaboratorii (2000) stabilesc o corelație interesantă între coeficientul de frecare și uzura pinului. În figura 6.16 se prezintă variațiile coeficientului de frecare pentru trei zone distincte de uzură: o valoare constantă a coeficientului de frecare pentru o uzură redusă (curba a), variații importante ale coeficientului de frecare în zonele de uzură medie (curba b) și de uzură severă (curba c). În aceste tipuri de teste, uzura este evaluată prin reducerea lungimii pinului din polimer și prin analizarea cantității de polimer depus pe discul din oțel.

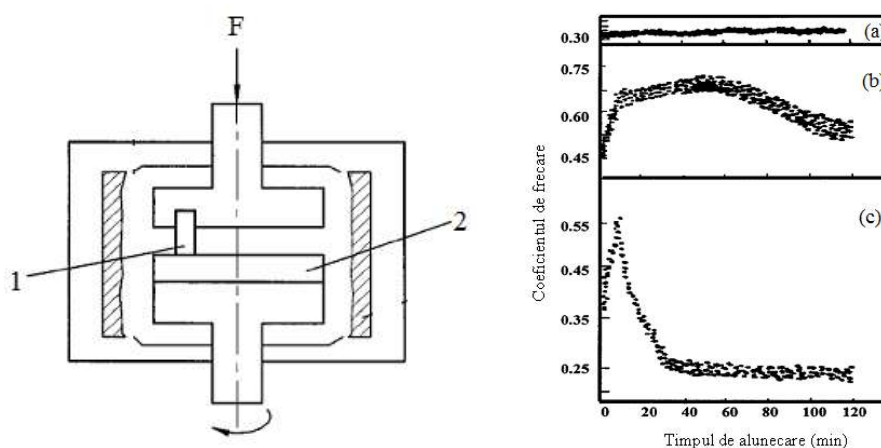


Figura 6.16 Echipament pin-disc: 1 – pin din polimer, 2 – disc din oțel (stânga) și variațiile coeficientului de frecare în timp pentru trei zone de uzură: a) uzură redusă, b) uzură medie și c) uzură severă (Tongseng și colab., 2000)

6.3 Metoda rolă-plan

Teste comparative pentru o serie de polimeri utilizați ca materiale cu proprietăți de autolubrifiere au fost efectuate de către Zsidai și colaboratorii (2001). Sistemul tribologic utilizat a fost realizat dintr-un cilindru de polimer în contact cu o placă de oțel, cu frecare liniară de alunecare fără lubrifiere. Schema echipamentului și a tribosistemului rolă-placă este prezentată în figura 6.17.

S-au efectuat două categorii de teste: A) teste cu durată de testare de 2 ore și încărcare 100 N, B) teste cu durată de testare de 1 oră și încărcare 200 N. Materialele din care au fost confecționate rolele au fost de tip POM-H (poliacetat), PETP/PTFE (termoplasic) și câteva tipuri de poliamide. Dimensiunile rolelor și a plăcilor din oțel sunt date în figura 6.17.

Rugozitățile plăcilor din oțel au fost de $R_a=0,02-0,1 \mu\text{m}$ pentru testările din categoria A și de $R_a=0,15-0,4 \mu\text{m}$ pentru testările din categoria B. Frecvența de alunecare a rolei a fost de 30 Hz, ceea ce corespunde unei viteze de alunecare de 0,27 m/s, în condițiile unei curse impuse de 4,62 mm.

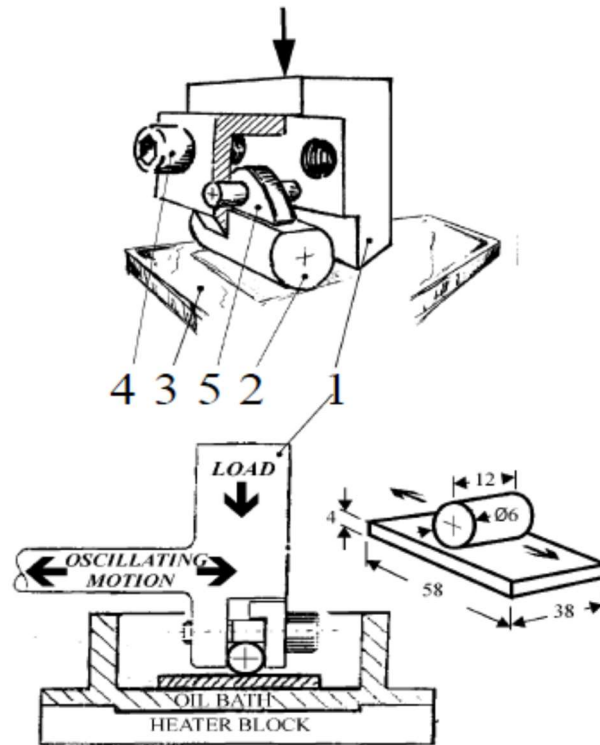


Figura 6.17 Echipamentul și metoda de testare utilizate de Zsidai și colab. (2001):
1-parghie de acționare a sistemului de fixare, 2- cilindru de polimer, 3- placă de oțel fixă,
4-șurub, 5- element de distribuire a forței (Zsidai și colab., 2001)

Rezultate interesante privind valorile maxime și cele medii ale coeficienților de frecare dinamici pentru diverse tipuri de polimeri și diverse rugozități a suprafeței plăcii sunt prezentate în figurile 6.18 și 6.19.

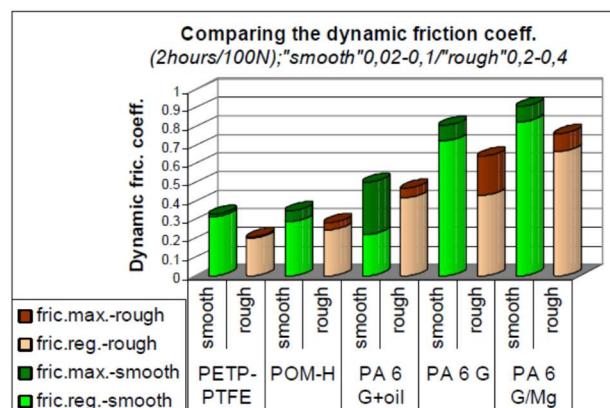


Figura 6.18 Comparație între coeficienții de frecare dinamici pentru diferiți polimeri, în funcție de starea suprafeței plăcii din oțel. Durata testelor 2 ore, forța normală aplicată 100N (Zsidai și colab., 2001)

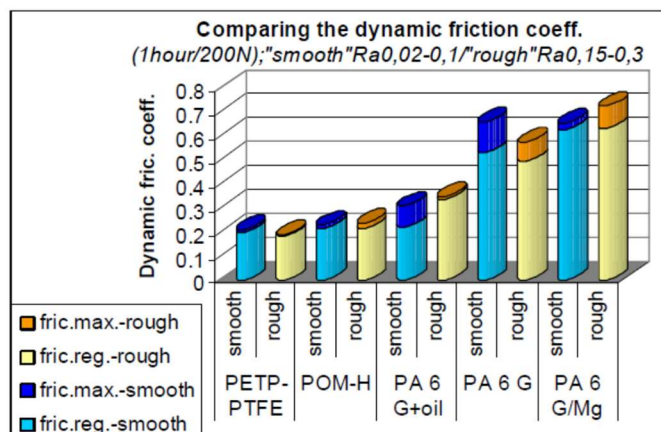


Figura 6.19 Comparație între coeficienții de frecare dinamici pentru diferiți polimeri, în funcție de starea suprafeței plăcii din oțel. Durata testelor 1 oră, forța normală aplicată 200N (Zsidai și colab., 2001)

Alte cercetări privind alunecarea unor cilindri din polimeri pe suprafețe plane sunt raportate de către Samyn și colaboratorii (2008); schema de principiu a tribometrului utilizat este prezentată în figura 6.20, cilindrii fiind executați din diverse compoziții polimerice cu inserție de fibră de carbon și placa fiind din oțel. Testele au fost efectuate cu viteze de alunecare de (0,3 – 1,2) m/s iar încărcarea pe rolă a variat între 50 N și 200 N. Testele au fost efectuate pe role din Poliimide TP cu fibră de carbon (FC-TP) sau Poliimidă TP cu fibră de carbon și cu teflon (FC-TP-PTFE) în condiții uscate și în prezența unui lubrifiant. În figura 6.21 sunt prezentate rezultatele pentru coeficientului de frecare dinamic în condiții uscate pentru cele două variante FC-TP (a) și FC-TP-PTFE (b) la o încărcare de 100 N și viteze de alunecare de 0,3 m/s, 0,6 m/s, 0,9 m/s și 1,2 m/s.

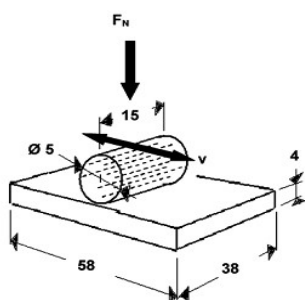


Figura 6.20 Tribometrul rolă-plan

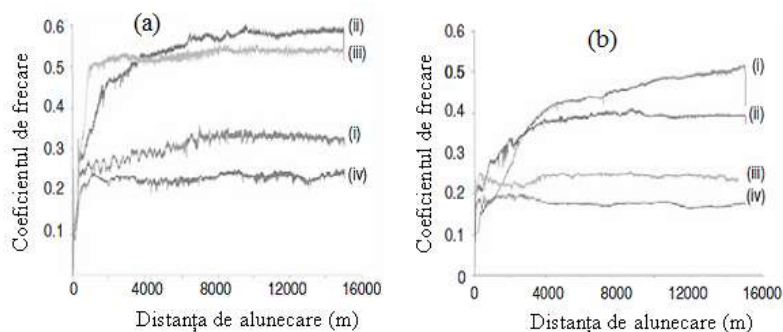


Figura 6.21 Rezultatele testelor de frecare pentru combinațiile CF-TP și CF-TP-PTFE (Samyn și colab., 2008)

6.4 Metoda disc cilindric - bloc din polimer

O altă metodă utilizată pentru studiul frecării dar și al uzurii materialelor polimerice se bazează pe contactul liniar dintre un disc din oțel pe care se apasă un bloc din polimer. Metoda poate fi utilizată pe mașinile Amsler. Astfel, pentru a investiga influența aditivării cu teflon (PTFE) asupra reducerii frecării poliamidei de tip PA66/PPS, Chen Z. și colaboratorii (2004) au determinat coeficientul de frecare utilizând tribomodelul disc-bloc din polimer prezentat în figura 6.22. Influența pozitivă a conținutului de teflon în poliamida PA/PPS se poate vedea clar în figura 6.23, cu reduceri de până la 0,15 a coeficientului de frecare la creșterea procentului de teflon la 30%.

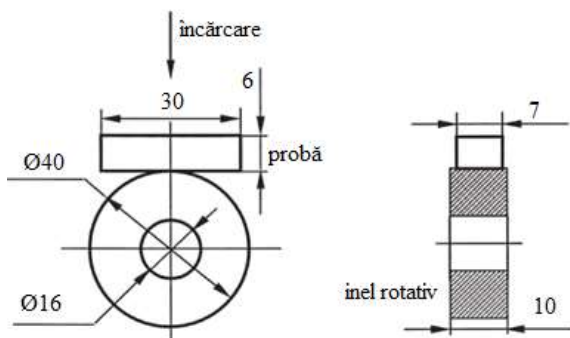


Figura 6.22 Reprezentare schematică a frecare al tribosistemului rolă-bloc din polimer supus frecării (Chen și colab., 2006)

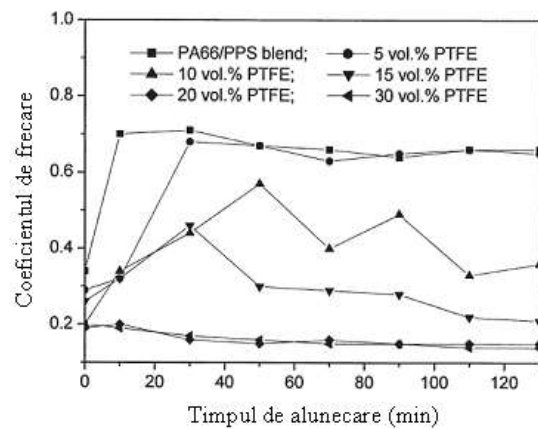


Figura 6.23 Variația coeficientului de frecare al compozitului PA/PPS cu diferite procente de PTFE în funcție de timpul de alunecare (Chen și colab., 2006)

Teste similare cu tribometru de tip inel - bloc din polimer au făcut și Georgescu și colaboratorii (2013) care au studiat comportarea la frecare și uzură a PBT pus în contact cu disc din oțel. Testele de frecare și uzură au fost efectuate cu ajutorul unui microtribometru UMT-2. Blocurile polimerice au avut dimensiunile 16,5 mm x 10 mm x 4 mm. Încercările s-au efectuat la viteze de $v=0,25$ m/s, 0,5 m/s și 0,75 m/s la sarcini de $F=1$ N, 2,5 N, 5 N, 10 N, 20 N, distanța de alunecare a fost $L=7500$ m. Testele pentru verificarea influenței sarcinii de încărcare, efectuate la viteze de 0,75 m/s au evidențiat că valorile coeficientului de frecare se mențin constante în timp iar la viteza de 0,5 m/s există o creștere continuă în timp a coeficientului de frecare, așa cum se poate observa în figura 6.24.

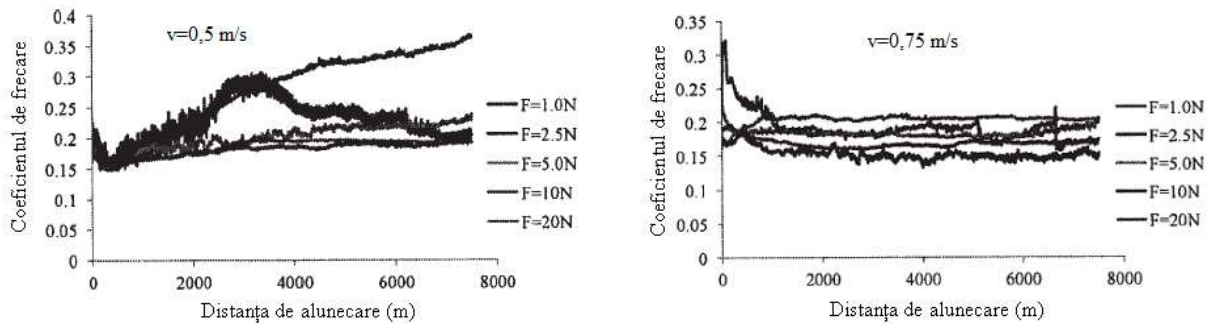


Figura 6.24 Evoluția coeficientului de frecare pentru două viteze de alunecare, pe o distanță de 7500m (Georgescu și colab., 2013)

6.5 Metoda rolă-rolă cu rostogolire și alunecare

O nouă tehnică de măsurare a caracteristicilor de frecare a contactului de rostogolire cu alunecare în cazul perechilor de discuri polimer-metal a fost propusă de Sukumaran și colectivul (2011). Pentru dezvoltarea acestei metode s-a utilizat un sistem FZG (utilizat în testarea roților dințate), modificat. În figura 6.25 este dată reprezentarea schematică a acestui ansamblu. Lagărul flexibil al aparatului este încărcat cu ajutorul unor greutateți, asigurându-se astfel contactul permanent al probelor, chiar și în cazul când acestea sunt uzate. Arborele pe care este montat discul de oțel este prevăzut cu un senzor pentru măsurarea momentului de frecare. Senzorul de temperatură cu IR este montat perpendicular la o distanță de 50 mm față de suprafețele de contact pentru a măsura în timp real temperatura materialelor. Toate datele sunt înregistrate cu ajutorul unei plăci de achiziții. Parametri de testare au fost: forța de 210 N, turațiile discurilor au fost de 10, 50, 100, 200 și 500 rot/min.

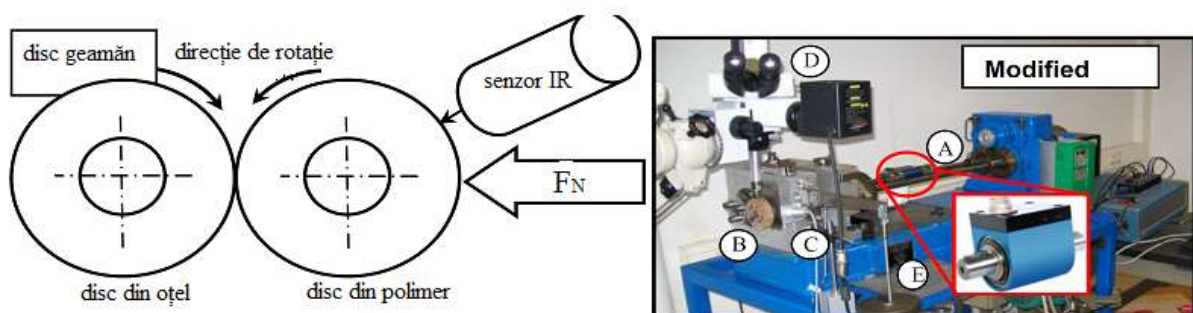


Figura 6.25 Reprezentare schematică a ansamblului FZG modificat și a instrumentației pentru două discuri identice. A) senzor pentru măsurarea momentului, B) probele de test, C) senzor IR, D) microscop optic, E) încărcarea (Sukumaran și colab., 2011)

Pentru validarea sistemului triblogic s-au efectuat teste repetitive pe șase probe la diverse viteze (figura 6.26), rezultatul arătând o forță de frecare similară

pentru fiecare probă testată. O raportare a forțelor de frecare la forța de apăsare conduce la valori ale coeficientului de frecare de 0,04 –0,07, ceea ce sugerează o dominantă de rostogolire în cazul testelor.

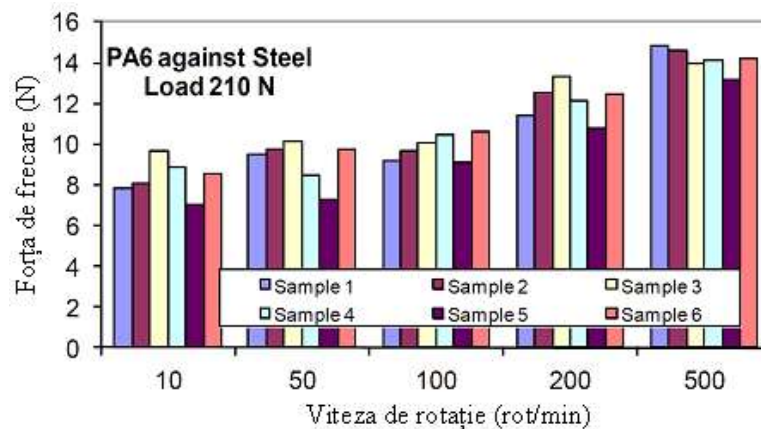


Figura 6.26 Forța de frecare pentru cinci determinări la viteze diferite pentru o forță normală de 210N (Sukumaran și colab., 2011)

6.6 Metoda straturilor de polimeri la contact punctual

Metodele de fabricație a polimerilor sau a componentelor pe care se depun straturi de polimer pot crea suprafețe care realizează un contact punctual. Astfel Qian și colaboratorii (2004) au inițiat o serie de teste privind comportarea la frecare dinamică a polimerilor care absorb la nivelul suprafețelor amestecuri de surfactanți. Aparatura utilizată pentru măsurarea forței de frecare este reprezentată schematic în figura 6.27, unde proba superioară (1) este așezată pe un sistem de arcuri și plăci amortizoare (2) care pot măsura forțe bidirecționale cu o acuratețe de aproximativ 10 μ N. Proba inferioară (3) este atașată printr-un mecanism cu arcuri (4), folosit pentru măsurarea sarcinii, de un actuator piezoelectric (5), care generează o mișcare laterală bidimensională pentru a crea frecare. Acest actuator piezoelectric este atașat de un actuator piezoelectric vertical care controlează distanța dintre probe.

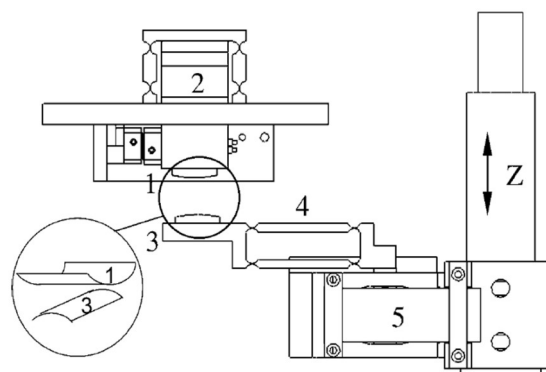


Figura 6.27 Reprezentare schematică a aparaturii folosită de Qian și colab. (2004)

Experimentele privind măsurarea forței de frecare s-au executat analizând comportarea probelor la aplicarea unor sarcini diverse cât și prin aplicarea unor diferite medii de separare a suprafețelor. Pentru straturile de HC (hidroxietil celuloză) depuse pe suprafețele 1 și 3 din figura 2.27, având 6 nm grosime, cu o încărcare de 2 mN și o viteză de alunecare de 19 $\mu\text{m/s}$, se dezvoltă o forță de frecare de aproximativ 200 μN . În figura 6.28 se prezintă succesiunea forțelor de frecare la deplasarea într-un sens și-n sens opus.

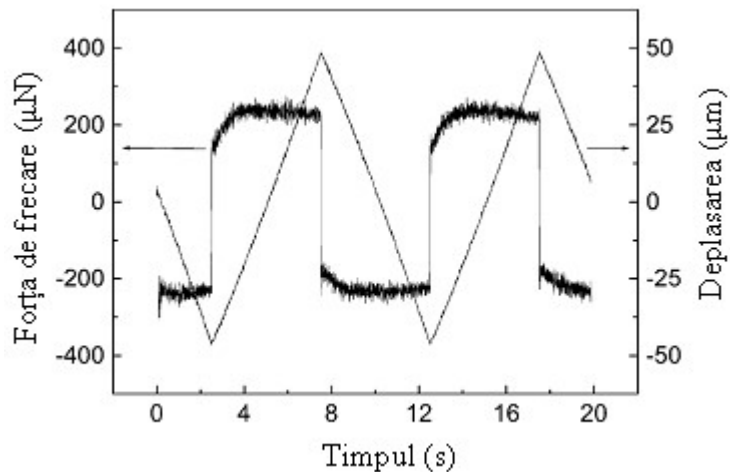


Figura 6.28 Variația forței de frecare în timp (Qian și colab., 2004)

6.7 Metode standardizate de testare a frecării pentru folii și pelicule din polimeri

Standardele ASTM D1894 și ISO 8295 prevăd metodologia de testare pentru coeficienți statici și dinamici a peliculelor și foliilor din materiale plastice (Figura 6.29 și 6.30). Astfel pentru determinarea coeficienților de frecare se utilizează o sanie, care poate fi staționară și pe acesta se află în mișcare un plan pe care este fixată folia de polimer (ASTM D1894-01, ASTM D3702). Viteza recomandată este de 150 ± 30 mm/min. Condițiile de testare sunt: $23 \pm 2^\circ\text{C}$ și $50 \pm 5\%$ umiditate.

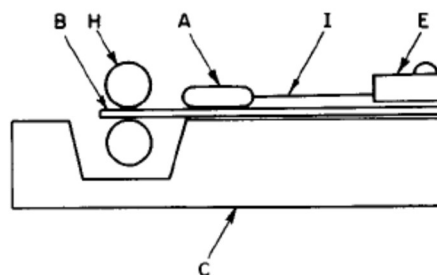


Figura 6.29 Stand pentru testarea coeficienților de frecare la folii conform ASTM D1894. A-sanie, B-plan, C-bază suport, E- indicator cu arc, H- role de transmisie care asigură o viteză constantă, I- fir monofilar de nylon. (ASTM D1894-01, ASTM D3702)

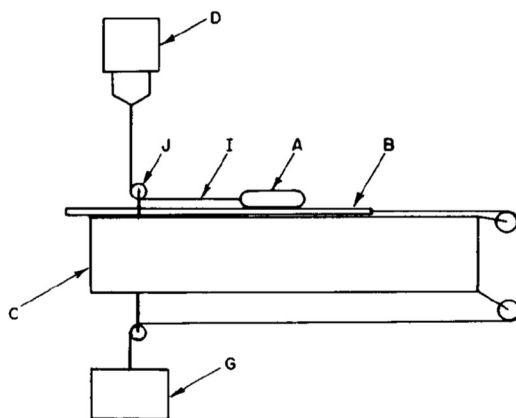


Figura 6.30 Stand pentru testarea coeficienților de frecare conform ASTM D1894: A-sanie, B-plan, C-bază suport, D- indicator, G- element de transmisie care asigură o viteză constantă, I- fir monofilar de nylon, J-scripet cu coeficient de frecare redus (ASTM D1894, ASTM D3702)

O variantă modernă de echipament pentru studiul frecării la folii și pelicule de polimeri este prezentată în figura 6.31, conform normei ASTM D1894 – 14. Pe suprafața mesei se depune folia sau stratul de polimer căruia urmează să i se determine coeficientul de frecare. Un bloc din oțel cu greutatea de 2 N este deplasat pe suprafața acoperită de folia de polimer iar forța de frecare este înregistrată automat.

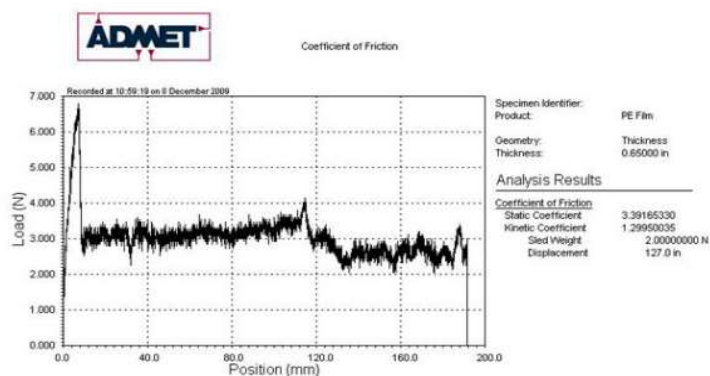
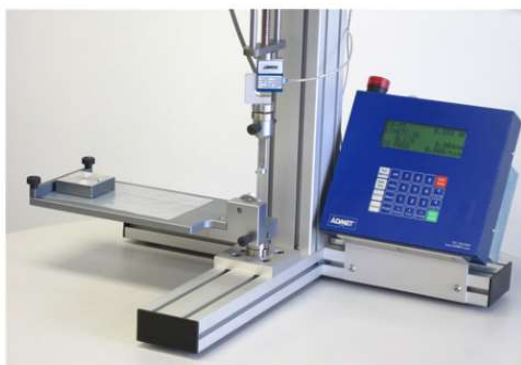


Figura 6.31 Triobometru cu suprafețe de contact plane pentru studiul frecării la folii și straturi de polimeri depuse (stânga); înregistrarea forței de frecare cu indicarea coeficientului de frecare static și dinamic (<http://admet.com/testing-standards/astm-d1894-testing/>)

BIBLIOGRAFIE

- Benyus JM., Biomimicry. Innovation Inspired by Nature, Harper Collins Publishers, New York : Quill, 2002
- Shimomura M. The new trends in next generation biomimetics material technology: learning from biodiversity. *Sci Technol Trends Q Rev.* 2010; 37: 53–75
- M. Scherge and S. Gorb, Biological Micro- and Nano-tribology. Nature's Solutions, Springer 2001
- BLOKON, Bionics Competence Network
- Jangsun Hwang, Yoon Jeong, Jeong Min Park, Kwan Hong Lee, Jong Wook Hong, Jonghoon Choi, Biomimetics: forecasting the future of science, engineering, and medicine, *International Journal of Nanomedicine* 2015:10 5701–5713
- Freedman R. The Wright Brothers: How They Invented the Airplane. New York: Holiday House; 1991.
- Jakab PL. Visions of a Flying Machine: The Wright Brothers and the Process of Invention. Smithsonian Institution Press; 1990
- Schmitt O.H., "Some interesting and useful biomimetic transforms," Proceedings of Third International Biophysics Congress, Boston, Massachusetts, August 29–September 3, 1969, p. 297
- Peter Forbes, The gecko's foot: bio-inspiration— engineering new materials from nature, Norton & Company Incorporated, 2006
- Lee DW, Graham R. Leaf optical properties of rainforest sun and extreme shade plants. *American Journal of Botany.* 1986;73:1100–1108.
- Gabriel Calvin Todd, Haskell Jacob, Sethi Satyendra. Sacrificial multilayer anti-reflective coating for mos gate formation. Google Patents; 2001
- Starețu Ionel, Bionica, o știință fundamentală prea puțin promovată, *Buletinul AGIR*, nr. 1/2016, ianuarie-martie
- Wolfgang Send et al., Artificial hinged-wing bird with active torsion and partially linear kinematics, 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, ICAS 2012
- Mihail, N.N., Giurgea, A.R., Ce este bionica, Ed. Științifică și Enciclopedică, București 1984.

- Gheorghe, V., Popescu, A. I., Introducere în Bionică, București, Editura Științifică, 1990.
- Mary McCarty, Life of bionics founder a fine adventure, Dayton Daily News, 29 January 2009
- Kurzmann, Ernst; Fladerer, Johannes-Paul, ManagemANT Was Fach- und Führungskräfte von Ameisen lernen können (1. Auflage ed.). Frankfurter Allgemeine Buch, 2017
- Fladerer, Johannes-Paul; Kurzmann, Ernst, WISDOM OF THE MANY: how to create self-organisation and how to use collective intelligence in companies and in society from mana, 2019.
- Bhushan, Bharat, Biomimetics: lessons from nature-an overview, Philosophical Transactions of the Royal Society A: 367 (2009): 1445–1486.
- <https://dSPACE.tul.cz/server/api/core/bitstreams/85d8eff9-967f-48aa-a74c-e8c0df65911b/content>
- <https://thekidshouldseethis.com/post/namib-desert-beetle-stenocara-gracilipes-drought-biomimicry>
- Liat Clark, This Self-Filling Water Bottle Mimics a Desert Beetle, <https://www.wired.com/2012/11/namib-beetle-bottle/>
- Shuichi Kinoshita, Shinya Yoshioka and Kenji Kawagoe, Mechanisms of structural colour in the Morpho butterfly: cooperation of regularity and irregularity in an iridescent scale, Proc. R. Soc. Lond. B (2002) 269, 1417–1421
- Isabella De Bellis, Bin Ni, Daniele Martella, Camilla Parmeggiani, Patrick Keller, Diederik S. Wiersma, Min-Hui Li,* and Sara Nocentini, Color Modulation in Morpho Butterfly Wings Using Liquid Crystalline Elastomers, Adv. Intell. Syst.2020,2, 2000035 (10 pages)
- ZHONGJIA HUANG*,†,|| , CONGCONG CAI*, GANG WANG*, HUI ZHANG‡,§ , MARKO HUTTULA¶ and WEI CAO, STRUCTURAL COLOR MODEL BASED ON SURFACE MORPHOLOGY OF MORPHO BUTTERFLY WING SCALE, Surface Review and Letters, Vol. 23, No. 5 (2016) 1650046 (9 pages)
- Sichao Zhang & Yifang Chen, Nanofabrication and coloration study of artificial Morpho butterfly wings with aligned lamellae layers, Scientific Reports, 5:16637 (2015)
- Glenn S. Smith, Structural color of Morpho butterflies, Am. J. Phys. 77, 1010 (2009)

- Gordon Zyla, Alexander Kovalev, Evgeny L. Gurevich, Cemal Esen, Ying Liu, Yongfeng Lu, Stanislav Gorb, Andreas Ostendorf, Structural colors with angle-insensitive optical properties generated by Morpho-inspired 2PP structures, *Applied Physics A* (2020) 126:740
- Alejandra Ruiz-Clavijo,† Yoichiro Tsurimaki,‡ Olga Caballero-Calero,† George Ni,‡ Gang Chen,‡ Svetlana V. Boriskina,*,‡ and Marisol Martín-Gonzalez, Engineering a Full Gamut of Structural Colors in All-Dielectric Mesoporous Network Metamaterials, *ACS Photonics* 2018, 5, 6, 2120–2128
- Ajay P. Malshe, Salil Bapat, Kamlakar P. Rajurkar, Han Haitjema, Bio-inspired textures for functional applications *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 67 (2018) 627–650
- Siddiqui, N. A., Asrar, W., & Sulaeman, E. (2017). Literature Review: Biomimetic and Conventional Aircraft Wing Tips. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 4(2).
- Kirsten Wommer and Kristina Wanieck, Biomimetic Research for Applications Addressing Technical Environmental Protection, *Biomimetics* 2022, 7, 182
- Jupp J., Wing aerodynamics and the science of compromise, *Aeronautical Journal* 105 (1053) (November 2001) 633–641.
- J.R. Chambers, Concept to reality: Contributions of the Langley Research Center to U.S. Civil Aircraft of the 1990s, *NASA History Series, NASA SP-2003-4529*, 2003
- T. Wan, H.-C. Chou, K.-W. Lien, Aerodynamic efficiency study of modern spiroid winglets, in: 25th Congress of International Council of the Aeronautical, Sciences, September 2006, Germany, Paper ICAS 2006-3.7S.
- M. Nazarinia, M.R. Soltani, K. Ghorbanian, Experimental study of vortex shapes behind a wing equipped with different winglets, *Journal of Aerospace Science and Technology* 3 (1) (2006) 1–15.
- Alerstam T, Gudmundsson G, Jönsson P, Karlsson J, Lindström Å. Orientation, migration routes and flight behaviour of knots, turnstones and Brant Geese departing from Iceland in spring. *Arctic*. 1990; 43:201–214.
- Nikola N. Gavrilović, Boško P. Rašuo, George S. Dulikravich, Vladimir B. Parezanović, Commercial Aircraft Performance Improvement Using Winglets, *FME Transactions* (2015) 43, 1-8
- Andrew R. Parker and Helen E. Townley, Biomimetics of photonic structures, *Nature Nanotechnology* vol. 2, June 2007, 347-353

- Z.W. Han, Z.Wang, X.M.Feng, B.Li, Z.Z.Mu, J.Q.Zhang, S.C.Niu, L.Q. Ren, Antireflective surface inspired from biology: A review, *Biosurface and Biotechnology* 2 (2016) 137–150
- Goodyer, J. (ed.), “Dolphins are phenomenally good at using echolocation, much better than man-made devices”, *BBC Focus*, Summer 2018, pp. 18–10
- Starkhammar, J., Moore, P.W., Talmadge, L., and Houser, D.S., Frequency-dependent variation in the two-dimensional beam pattern of an echolocating dolphin, *Biology Letters* 7(6): 836-839, 2011 | doi:10.1098/rsbl.2011.0396
- Lund University, Dolphins use double sonar: Researchers discover that dolphins can generate two sound beam projections simultaneously, *sciencedaily.com*, 8 June 2011
- Reinhold, I., Sandsten, M., and Starkhammar, J., Objective detection and time-frequency localization of components within transient signals, *J. Acoustical Society of America* 143(4):2368–2378, 1 April 2018 | doi:10.1121/1.5032215
- Medimaging International staff writers, Dolphin echolocation could advance medical ultrasound, *medimaging.net*, 11 June 2018.
- Sarfati, J., Echolocation ‘evolved in the same way’, creation.com/echolocation-homoplasy, 3 October 2013.
- Perkins, S., Learning to listen: How some vertebrates evolved biological sonar, *Science News* 167(20):314, 2005.
- A. Kaveh ↑ , N. Farhoudi, A new optimization method: Dolphin echolocation, *Advances in Engineering Software* 59 (2013) 53–70
- R. Gosling, Medical Imaging with ultrasound: some basic physics, *Phys. Educ.* 24 (1989), 215-221
- Ravi Singhal, <https://ektalks.blogspot.com/2015/06/medical-imaging-ultrasound-imaging-on.html>
- Z. Čarija, E. Marušić, Z. Novak, S. Fućak, NUMERICAL ANALYSIS OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A BUMPED LEADING EDGE TURBINE BLADE, *Engineering Review* Vol. 34, Issue 2, 93-101, 2014
- Frank E. Fish,¹ Laurens E. Howle† and Mark M. Murray, Hydrodynamic flow control in marine mammals, *Integrative and Comparative Biology*, volume 48 (2008), number 6, pp. 788–800

- Taylor Hamilton, 2008, <https://www.technologyreview.com/2008/03/06/221447/whale-inspired-wind-turbines/>
- Izadi, H.; Stewart, K.M.E.; Penlidis, A. (9 July 2014). "Role of contact electrification and electrostatic interactions in gecko adhesion". *Journal of the Royal Society Interface*. **11** (98): 20140371
- Yasong Li, Jeffrey Krahn, Carlo Menon, Bioinspired Dry Adhesive Materials and Their Application in Robotics: A Review, *Journal of Bionic Engineering* 13 (2016) 181–199
- Puthoff, J.B.; Prowse, M.; Wilkinson, M.; Autumn, K. (2010). "Changes in materials properties explain the effects of humidity on gecko adhesion". *Journal of Experimental Biology*. **213** (21): 3699–3704
- Prowse, M.S.; Wilkinson, Matt; Puthoff, Jonathan B.; Mayer, George; Autumn, Kellar (2011). "Effects of humidity on the mechanical properties of gecko setae". *Acta Biomaterialia*. **7** (2): 733–738.
- Huber, G.; Mantz, H.; Spolenak, R.; Mecke, K.; Jacobs, K.; Gorb, S.N.; Arzt, E. (2005). "Evidence for capillarity contributions to gecko adhesion from single spatula nanomechanical measurements". *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **102** (45): 16293–6.
- Chen, B.; Gao, H. (2010). "An alternative explanation of the effect of humidity in gecko adhesion: stiffness reduction enhances adhesion on a rough surface". *International Journal of Applied Mechanics*. **2** (1): 1–9.
- Loskill, P.; Puthoff, J.; Wilkinson, M.; Mecke, K.; Jacobs, K.; Autumn, K. (September 2012). "Macroscale adhesion of gecko setae reflects nanoscale differences in subsurface composition". *Journal of the Royal Society Interface*. **10** (78): 20120587
- Lee, Haeshin; Lee, Bruce P.; Messersmith, Phillip B. (2007). "A reversible wet / dry adhesive inspired by mussels and geckos". *Nature*. **448** (7151): 338–341.
- Hsu, P.Y.; Ge, L.; Li, X.; Stark, A.Y.; Wesdemiotis, C.; Niewiarowski, P.H.; Dhinojwala, A. (24 August 2011). "Direct evidence of phospholipids in gecko footprints and spatula-substrate contact interface detected using surface-sensitive spectroscopy". *Journal of the Royal Society Interface*. **9** (69): 657–664
- Green, DW; Lee, KK; Watson, JA; Kim, HY; Yoon, KS; Kim, EJ; Lee, JM; Watson, GS; Jung, HS (25 January 2017). "High quality bioreplication of

intricate nanostructures from a fragile Gecko skin surface with bactericidal properties". *Scientific Reports*. 7: 41023.

- Watson, Gregory S.; Green, David W.; Schwarzkopf, Lin; Li, Xin; Cribb, Bronwen W.; Myhra, Sverre; Watson, Jolanta A. (2015). "A gecko skin micro/Nano structure – A low adhesion, superhydrophobic, anti-wetting, self-cleaning, biocompatible, antibacterial surface". *Acta Biomaterialia*. 21: 109–122.
- Dashuai Tao, JinWan, NoshirS.Pesika, HongboZeng, ZheyuLiu, XiangjunZhang, Yonggang Meng, YuTian, Adhesion and friction of an isolated gecko setal array: The effects of substrates and relative humidity, *Biosurface and Biotribology*1(2015)42–49
- Qilan Li, A practical fabrication method of the gecko-inspired easy-removal skin adhesives, *Biosurface and Biotribology*3(2017)66–74
- Elliot W. Hawkes, Eric V. Eason, David L. Christensen and Mark R. Cutkosky, Human climbing with efficiently scaled gecko-inspired dry adhesives, *J. R. Soc. Interface*12 (2015):20140675
- Kellar Autumn and Jonathan Puthoff, Properties, Principles, and Parameters of the Gecko Adhesive System, A.M. Smith (ed.), *Biological Adhesives*, Springer 2016, 245-280
- Andrei Kozlov, Harun Chowdhury*, Israt Mustary, Bavin Loganathan and Firoz Alam, Bio-inspired design: aerodynamics of boxfish, *Procedia Engineering* 105 (2015) 323 – 328
- S. Van Wassenbergh, K. van Manen, T. A. Marcroft, M. E. Alfaro and E. J. Stamhuis, Boxfish swimming paradox resolved: forces by the flow of water around the body promote maneuverability, *J. R. Soc. Interface* 12 (2015): 20141146.
- Harun Chowdhury, Rezaul Islam, Mohammed Hussein, Mohamed Zaid, Bavin Loganathan, Firoz Alam, Design of an energy efficient car by biomimicry of a boxfish, 2nd International Conference on Energy and Power, ICEP2018, 13–15 December 2018, Sydney, Australia, *Energy Procedia* 160 (2019) 40–44
- Evan Ackerman, 2014, *IEEE Spectrum*, <https://spectrum.ieee.org/festo-newest-robot-is-a-hopping-bionic-kangaroo>
- <https://stem.festo.com/us/en/our-approach/bionics/bionic-projects-by-festo/index.html>
- He-xuan Hu, Bo Tang, and Ye Zhang, Application of the Bionic Concept in Reducing the Complexity Noise and Drag of the Mega High-Speed Train

Based on Computer Simulation Technologies, Hindawi Complexity Volume 2018, Article ID 3689178, 14 pages

- Soyeon, K; Yoon, J and Cho, K (2016). A Study on Organic Architecture Characteristics in Works of Gaudi and Hundertwasser. Journal of Korea Institute of Spatial Design, Vol. 10 No. 6: 23-32.
- Liu, P. H and Chen, C. W (2015). An exploratory study of the geometrical elements in Gaudi's Architecture. International Journal of Arts & Sciences, Vol 08 (03): 51–58. ISSN: 1944-6934
- Salas, Mirat, C;Bedoya, Frutos, C and Adell, Argilés, J. M. (2018) Antonio Gaudí, percussionist of sustainability and biomimetics in architecture, 100 years in advance [online]. Consultation date: May 27, 2021. In: ACE: Architecture, City and Environment = Architecture, city and environment 13 (37): 71-98.
- <https://steemit.com/architecture/@snaves/biomimetic-architecture-sagrada-familia>
- Noirot C, Darlington JP. Termite Nests: Architecture, Regulation and Defence. Termites: Evolution, Sociality, Symbioses, Ecology. Springer; 2000:121–139.
- Bonabeau E, Theraulaz G, Deneubourg J, et al. A model for the emergence of pillars, walls and royal chambers in termite nests. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. 1998;353(1375):1561–1576.
- Emerson AE. Termite nests – a study of the phylogeny of behavior. Ecol Monogr. 1938; 8:247–284
- Turner JS, Soar RC. Beyond biomimicry: what termites can tell us about realizing the living building. Proc. 1st Int. Conf. Industrialized, Intelligent Construction 2008.
- John R.J. French and Berhan M. Ahmed (Shiday). The challenge of biomimetic design for carbon-neutral buildings using termite engineering. Insect Sci. 2010;17(2):154–162.
- Gunnell K, Du Plessis C, Gibberd J. Green Building in South Africa: Emerging Trends. Department of Environmental Affairs and Tourism (DEAT); 2009.
- Lili Yang, Zhiqing Huang, Optical characteristics of silicon recombination random nanostructures for solar cells, Energy Procedia 158 (2019), 998-1003
- James Dacey, 2009, <https://physicsworld.com/a/moth-eyes-inspire-more-efficient-solar-cell/>

- Mann S. Life as a nanoscale phenomenon. *Angew Chem Int Ed.* 2008; 47(29):5306–5320.
- Li M, Huang X, Tang TD, Mann S. Synthetic cellularity based on non-lipid micro-compartments and protocell models. *Curr Opin Chem Biol.* 2014; 22:1–11
- Gong Y-K, Winnik FM. Strategies in biomimetic surface engineering of nanoparticles for biomedical applications. *Nanoscale.* 2012;4(2):360–368.
- L. Ivanović, A. Vencl, B. Stojanović, B. Marković, Biomimetics Design for Tribological Applications, *Tribology in Industry* Vol. 40, No. 3 (2018) 448-456
- Plant Biomechanics Group, 2013, <https://www.bionik-vitrine.de/autoreifen.html>
- John Barnes, Tree frog and tire technology, *Tire Technology International*, March'99, pp. 42- 47
- T. Endlein, W.J.P. Barnes, D.S. Samuel, N.A. Crawford, A.B. Biaw, U. Grafe, Sticking under wet conditions: The remarkable attachment abilities of the torrent frog, *Stauroids guttatus*, *PLoS ONE*, vol. 8, no. 9, Paper 73810, 2013
- Thomas Endlein and W. Jon. P. Barnes, Wet Adhesion in Tree and Torrent Frogs, *Encyclopedia of Nanotechnology* 2015
- M. Kappl, F. Kaveh, W.J.P. Barnes, Nanoscale friction and adhesion of tree frog toe pads, *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 11, no. 3, Paper 035003, 2016
- B.N.J. Persson, Wet adhesion with application to tree frog adhesive toe pads and tires, *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 19, no. 37, Paper 376110, 2007
- J. Iturri, L. Xue, M. Kappl, L. García-Fernández, W.J.P. Barnes, H.-J. Butt, A. del Campo, Torrent frog-inspired adhesives: Attachment to flooded surfaces, *Advanced Functional Materials*, vol. 25, no. 10, pp. 1499-1505, 2015
- W. Baumgartner, F. Fidler, A. Weth, M. Habbecke, P. Jakob, C. Butenweg, W. Böhme, Investigating the locomotion of the sandfish in desert sand using NMR-imaging, *PLoS ONE*, vol. 3, no. 10, Paper 3309, 2008
- W. Baumgartner, F. Saxe, A. Weth, D. Hajas, D. Sigumonrong, J. Emmerlich, M. Singheiser, W. Bohme, J.M. Schneider, *The sandfish's skin: Morphology, chemistry and reconstruction*, *Journal of Bionic Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 1-9, 2007
- Christian Greiner and Michael Schäfer, Bio-inspired scale-like surface textures and their tribological properties, *Bioinspir. Biomim.* 10 (2015) 044001

- Boden, S. A. & Bagnall, D. M. in Proc. 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii 1358–1361 (IEEE, 2006).
- Filiz Tavsan, Elif Sonmez, Biomimicry in Furniture Design, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 197 (2015) 2285 – 2292
- Biljana S. Jović and Anđela D. Mitić, Exploration of nature-based biomimetic approach in landscape architectural design: parametric study of candelabra model design, *Jović and Mitić Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art* (2020) 3:25, 11 pages
- <https://ciprianicharlesdesigns.wordpress.com/2014/02/28/nature-inspired-furniture/>
- Dobra Bies, 3 November 2022, <https://www.architekturaibiznes.pl/en/biomimetic-unit-housing,13968.html>
- Jennifer Horton, 12 May 2021, <https://animals.howstuffworks.com/mammals/hippo-sunscreen.htm>
- Jeronimidis, G. 2000 Structure–property relationships in biological materials. In *Structural biological materials* (ed. M. Elices), pp. 3–16. Oxford, UK: Pergamon.
- Callister, W. D. 2007 *Materials science and engineering: an introduction*. New York, NY: Wiley de Gennes, P. G. & Prost, J. 1993 *The physics of liquid crystals*, p. 139. Oxford, UK: Oxford University Press.
- EMILY J. REED, LISA KLUMB, MAXWELL KOOBATIAN and CHRISTOPHER VINEY, Biomimicry as a route to new materials: what kinds of lessons are useful?, *Phil. Trans. R. Soc. A* (2009) 367, 1571–1585
- Vincent, J. F. V., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N.R., Bowyer, A. & Pahl, A.-K., Biomimetics: its practice and theory. *J. R. Soc. Interface* 3 (2006), 471–482.
- Saikawa, Y., Hashimoto, K., Nakata, M., Yoshihara, M., Nagai, K., Ida, M. & Komiya, T., The red sweat of the hippopotamus. *Nature* 429 (2004), 363.
- Viney, C., Silk fibres: origins, nature and consequences of structure. In *Structural biological materials* (ed. M. Elices), 2000, pp. 293–333. Oxford, UK: Pergamon
- Viney, C., Natural silks: archetypal supramolecular assembly of polymer fibres. *Supramolecular Sci.* 4 (1997), 75–81
- Dorow, W. H. O., Maschwitz, U. & Rapp, S. The natural history of *Polyrhachis (Myrmhopla) muelleri* Forel 1893 (Formicidae Formicinae), a weaver ant with

mimetic larvae and an unusual nesting behaviour. *Trop. Zool.* 3(1990), 181–190

- Work, R. W., A comparative study of the supercontraction of major ampullate silk fibers of orb-web-building spiders (araneae). *J. Arachnol.* 9 (1981), 299–308.
- Bell, F. I., McEwen, I. J. & Viney, C. Supercontraction stress in wet spider dragline, *Nature* 416 (2002), 37
- Smith, C., Ritchie, J., Bell, F. I., McEwen, I. J. & Viney, C., Creep and low strength of spider dragline subjected to constant loads. *J. Arachnol.* 31 (2003), 421–424
- Ritchie, J., Smith, C., Bell, F. I., McEwen, I. J. & Viney, C., Effects of wetting and desiccation on the creep properties of spider dragline silk. In *Mechanical properties of bioinspired and biological materials* (eds C. Viney, K. Katti, F.-J. Ulm & C. Hellmich), 2005, pp. 125–130. Warrendale, PA: Materials Research Society
- Viney, C. & Bell, F. I., Inspiration versus duplication with biomolecular fibrous materials: learning nature's lessons without copying nature's limitations. *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* 8 (2004), 165–171.
- Pérez-Rigueiro, J., Viney, C., Llorca, J. & Elices, M., Silkworm silk as an engineering material. *J. Appl. Polym. Sci.* 70 (1998), 2439–2447
- Pérez-Rigueiro, J., Elices, M., Llorca, J. & Viney, C., Tensile properties of *Argiope trifasciata* drag line silk obtained from the spider's web. *J. Appl. Polym. Sci.* 82 (2001), 2245–2251
- Vendrely, C. & Scheibel, T., Biotechnological production of spider-silk proteins enables new applications. *Macromol. Biosci.* 7 (2007), 401–409
- Jin, H.-J. & Kaplan, D. L. 2003 Mechanism of silk processing in insects and spiders. *Nature* 424, 1057–1061.
- Lawrence, B. D., Cronin-Golomb, M., Georgakoudi, I., Kaplan, D. L. & Omenetto, F. G. 2008 Bioactive silk protein biomaterial systems for optical devices. *Biomacromolecules* 9, 1214–1220
- Sofia, S., McCarthy, M. B., Gronowicz, G. & Kaplan, D. L. 2001 Functionalized silk-based biomaterials for bone formation. *J. Biomed. Mater. Res.* 54, 139–148
- Wang, Y., Rudym, D. D., Walsh, A., Abrahamsen, L., Kim, H.-J., Kim, H. S., Kirker-Head, C. & Kaplan, D. L. 2008 In vivo degradation of three-dimensional silk fibroin scaffolds. *Biomaterials* 29, 3415–3428

- Hardy, J. G., Romer, L. M. & Scheibel, T. R. 2008 Polymeric materials based on silk proteins. *Polymer* 49, 4309–4327.
- Jingxia Wang, Tiantian Fan, Xi Li, Xiaoxia Hu, Weidong Huang, Wensu Yuan and Zhi Lin, Artificial superstrong silkworm silk surpasses natural spider silks, *Matter* 5, 4396–4406, December 7, 2022
- Cranford, S.W., Pugno, N.M., Buehler, M.J. (2014). Silk and Web Synergy: The Merging of Material and Structural Performance. In: Asakura, T., Miller, T. (eds) *Biotechnology of Silk. Biologically-Inspired Systems*, vol 5. Springer, Dordrecht
- S.W. Cranford, A. Tarakanova, N. Pugno, M.J. Buehler, “Nonlinear material behaviour of spider silk yields robust webs,” *Nature*, Vol. 482, pp. 72-76, 2012
- Ebrahimi, D., Tokareva, O., Rim, N. G., Wong, J. Y., Kaplan, D. L., & Buehler, M. J. (2015). Silk—Its Mysteries, How It Is Made, and How It Is Used. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 1(10), 864–876.
- Giesa, T., Perry, C. C., & Buehler, M. J. (2016). Secondary Structure Transition and Critical Stress for a Model of Spider Silk Assembly. *Biomacromolecules*, 17(2), 427–436
- Sinan Keten and Markus J. Buehler, Nanostructure and molecular mechanics of spider dragline silk protein assemblies, *J. R. Soc. Interface* (2010) 7, 1709–1721
- Tina Arndt, Gabriele Greco, Benjamin Schmuck, Jessica Bunz, Olga Shilkova, Juanita Francis, Nicola M Pugno, Kristaps Jaudzems, Andreas Barth, Jan Johansson, and Anna Rising, Engineered Spider Silk Proteins for Biomimetic Spinning of Fibers with Toughness Equal to Dragline Silks, *Adv. Funct. Mater.* 2022, 2200986
- Wei Lu, David L. Kaplan, and Markus J. Buehler, Generative Modeling, Design, and Analysis of Spider Silk Protein Sequences for Enhanced Mechanical Properties, *Adv. Funct. Mater.* 2023, 2311324
- Ling, S., Qin, Z., Li, C. *et al.*, Polymorphic regenerated silk fibers assembled through bioinspired spinning, *Nat Commun* 8, 1387 (2017)
- Zhao Qin and Markus J. Buehler, Webs measure up, *NATURE MATERIALS* VOL 12 MARCH 2013
- Koski, K. J., Akhenblit, P., McKiernan, K. & Yarger, J. L. *Nature Mater.* 12, 262–267 (2013).
- Solar, M., Buehler, M. Taking a leaf from nature's book. *Nature Nanotech* 7, 417–419 (2012)

- Greta Gronau, Zhao Qin and Markus J. Buehler, Effect of sodium chloride on the structure and stability of spider silk's N-terminal protein domain, *Biomater. Sci.*, 2013, 1, 276–284
- Davoud Ebrahimi, Olena Tokareva, Nae Rim, Joyce Y Wong, David L Kaplan, and Markus J. Buehler, Silk – its mysteries, how it's made, and how it's used, *CS Biomater. Sci. Eng.* 2015, 1, 10, 864–876
- Aklonis J.J. and W.J. MacKnight, *Introduction to polymer viscoelasticity*, Wiley, New York, 2nd edition, 1983.
- ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, *ASTM D1894-01*.
- ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, *ASTM D3702*.
- Barnea A., C. Oprisan and D. Olaru, *Prehension of the Small Cylindrical Objects by the Human Fingers. Friction and Adherence Processes*, Applied Mechanics and Materials-Advanced Concepts in Mechanical Engineering I, 658 (2014) 721-727.
- Barnea A., *Cercetări privind optimizări constructive la nivelul sistemelor de acțiune specifice roboților mobili*, Ph. D. Thesis, The “Gheorghe Asachi” Technical University of Iași, 2013.
- Bartenev G.M. și Lavrentev V.V., *Friction and wear of polymers*, Elsevier, 1981.
- Bele A., G. Stiubianu, C. Varganici, M. Ignat, M. Cazacu, *J Mater Sci* (2015) 50:6822–6832.
- Berselli Giovanni, Rocco Vertechy, Marcello Pellicciari and Gabriele Vassura, *Hyperelastic Modeling of Rubber-Like Photopolymers for Additive Manufacturing Processes*, Rapid Prototyping Technology – Principles and Functional Requirements, Dr. M. Hoque (Ed.), 2011, ISBN: 978-953-307-970-7.
- Bowden, Frank P.; and Tabor, D.: *The Friction and Lubrication of Solids*, Part 2, Oxford Clarendon Press (London), 1964
- Brinson Joseph, *Ultra-violet radiation effect on the mechanical properties of polyurea*, MSc thesis, California State University, Northridge, 2013.
- Briscoe B J, S K Sinha, *Wear of polymers*, Proc Instn Mech Engrs Vol 216 ,2002

- Buckley Donald H.: *Surface effects in adhesion, friction, wear, and lubrication*, Elsevier Scientific Pub. Co.(Amsterdam - Oxford - New York), 1981
- Cazacu M., M. Ignat, C. Racles, M. Cristea, V. Musteata, D. Ovezza, D. Lipcinski, J. Compos. Mater. 48 (2013) 1533.
- Cârlescu Vlad, *Caracterizarea statică și dinamică a polimerilor electroactivi dielectrici pentru aplicații mecatronice*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași, 2013.
- Chowdhury Mohammad Asaduzzaman et al., Experimental Investigation on Friction and Wear of Stainless Steel 304 Sliding Against Different Pin Materials, World Applied Sciences Journal 22 (12): 1702-1710, 2013.
- Daniela Ionita, Constantin Gaina, Mariana Cristea and Dorel Banabic, Tailoring the hard domain cohesiveness in polyurethanes by interplay between the functionality and the content of chain extender, RSC Adv., 2015, 5, 76852–76861.
- Deryagin BV, Muller VM, Toporov YuP. *Effect of contact deformation on the adhesion of particles*, J Colloid Interf Sci 1975; 53:314–26;
- Deryagin, B. V.; and Smilga, V. P. *Present State of Our Knowledge About Adhesion of Polymers and Semiconductors*, Proceedings of the Third International Congress of Surface Activity (Vortraege Originalfassung Kongress Grenzflaechenaktive Stoffe, 3), 1960, vol. 2, pp. 349-367.
- Erik Gustafsson, *Investigation of friction between plastic parts*, MASTER'S THESIS IN POLYMER TRIBOLOGY, Department of Applied Mechanics, Division of Solid Mechanics, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Göteborg, Sweden 2013.
- Garcia Manuel J. R., Oscar E. Ruiz S., Carlos Lopez, *Hyperelastic Material Modeling*, Technical Report, Laboratorio CAD/CAM/CAE Departamento de Ingeniería Mécanica Universidad EAFIT Medellín, January 20, 2005.
- Georgescu C., M.Botan, L.Deleanu, *Tribological Characterisation of PBT + Glass Bead Composites with the Help of Block on Ring Test*, Tribology in Industry Vol. 35, No. 2 (2013) 134-140
- Haugstad Greg, Jon A. Hammerschmidt and Wayne L. Gladfelter, *Viscoelasticity in Nanoscale Friction on Thin Polymer Films*, ACS, 1999.
- Jian L, *The sliding friction and wear properties of poly(vinylidene fluoride) composites filled with carbon fibres*, Proceedings of the Institution of

Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2009, 223:887

- Jinfeng Li, Fei Zhou, Xiaolei Wang, *Modify the friction between steel ball and PDMS disk under water lubrication by surface texturing*, *Meccanica* (2011) 46: 499–507
- Johnson KL, Kendall K, Roberts AD. *Surface energy and the contact of elastic solids*, *Proc R Soc* 1971;A324:301–13;
- Kar M. K.; Bahadur S. The wear equation for unfilled and filled polyoxymethylene *Wear*, 1974, 30, 337–348
- King R F and Tabor D, The Effect of Temperature on the Mechanical Properties and the Friction of Plastics, *Proceedings of the Physical Society. Section B*, Volume 66, Number 9.
- Kragelskii I.V., *Friction and wear*, Pergamon Press, Elmsford (1982) p. 458
- Mooney M., *A theory of large elastic deformation*, *J. Appl. Phys.* 11 (1940) 582–592.
- Mullins L., *Effect of stretching on the properties of rubber*, *Journal of rubber research* 16 (1947), 275-289.
- Myshkin N.K., M.I. Petrokovets, A.V. Kovalev, *Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer*, *Tribology International* 38 (2005) 910–921.
- Myshkin Nikolai, Alexander Kovalev, Dirk Spaltman, Mathias Woydt, *Contact Mechanics and Tribology of Polymer Composites*, *J. APPL. POLYM. SCI.* 2014, DOI: 10.1002/APP.39870.
- Myshkin NK, Kovalev AV, Kovaleva IN, Grigoriev AY. *Phenomenological model of adhesion contact. In: Proceedings of tribology of surface layers and coatings*, Prague, Czech Republic, 2004. p. 3–12.
- Myshkin NK, Petrokovets MI, Chizhik SA. *Simulation of real contact in tribology*, *Tribol Int* 1998; 31:79–86.
- Ortega-Saenz J.A., M. Kalbarczyk, R. Michalczewski, W. Piekoszewski, M. Szczerek, *Comparison of wear processes of biomaterials used in hip joint implants*, *Scientific problems of machines operation and maintenance*, 4 (156) 2008;
- Qian Linmao, Magali Charlot, and Eric Perez, Gustavo Luengo, Anne Potter, and Colette Cazeneuve, *Dynamic Friction by Polymer/Surfactant Mixtures Adsorbed on Surfaces*, *J. Phys. Chem. B* 2004, 108, 18608-18614

- Rivlin R.S., D.W. Saunders, *Philos. Trans. R. Soc. A* 243 (1951) 251–288.
- Rosen S. L., *Fundamental principles of polymeric materials*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 2nd edition, 1982.
- Sukumaran J, V Rodreguez, J De Pau, M Ando, P De Baets, *A Novel Measuring Technique to Evaluate Frictional Characteristics of Roll-Slip Contacts in Polymer-Metal Pairs*, (2011) *Advanced Materials and Processing, International conference, Proceedings.* p.153-159, <http://hdl.handle.net/1854/LU-1970608>.
- Treloar L.R.G., *Strains in inflated rubber sheet and mechanism of bursting*, *Institution of Rubber Industry - Transactions*, vol. 19, pp. 201-212, 1944a.
- Treloar L.R.G., *Stress–strain data for vulcanized rubber under various types of deformation*, *Trans. Faraday Soc.* 40: 59–70, 1944b.
- Treloar L.R.G., *The Physics of Rubber Elasticity*, Oxford University Press, Oxford, 1958.
- Verheyde B., M. Rombouts, A. Vanhulsel, D. Havermans, J. Meneve, M. Wangenheim, *Influence of surface treatment of elastomers on their frictional behaviour in sliding contact*, *Wear* 266(3-4):468-475 · February 2009.
- Virginio Quaglini and Paolo Dubini, *Friction of Polymers Sliding on Smooth Surfaces*, *Advances in Tribology Volume 2011*, Article ID 178943, 8 pages, doi:10.1155/2011/178943
- Viswanath N., D.G. Bellow, *Development of an equation for the wear of polymers*, *Wear*, Volumes 181–183, Part 1, February 1995, Pages 42–49, 10th International Conference on Wear of Materials.
- Yamaguchi Y., *Tribology of plastic materials*, Amsterdam: Elsevier; 1990 p. 362.
- Zhang S.-W., *Tribology of elastomers*, *Tribology and interface engineering series*, 47, 2004.
- Zhaobin Chen, Tongsheng Li, Yuliang Yang, Xujun Liu, Renguo Lv, *Mechanical and tribological properties of PA/PPS blends*, *Wear* 257, 696–707, (2004).
- Zhaobin Chen, Xujun Liu, Tongsheng Li, Renguo Lu, *Mechanical and Tribological Properties of PA66/PPS Blend. II. Filled with PTFE*, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 101, 969 –977 (2006).

- Zhou Shaofeng, Jin Huang and Qiaoxin Zhang, *Mechanical and tribological properties of polyamide-based composites modified by thermoplastic polyurethane*, Journal of thermoplastic Composite Materials, 2014, Vol 27(1) 18–34
- Živić Fatima, Miroslav Babić, Slobodan Mitrović, Dragan Adamović, Svetlana Pelemis, *Friction coefficient of UHMWPE during dry reciprocating sliding*, 13th International Conference on Tribology – Serbiatrib'13, 2013.
- Zsidai L., G. Kalacska, P. De Baets, F. V. Parys, M. Kozma, K. Vercammen *Investigation of tribological properties of engineering plastics with small scale*, Österreichische Tribologische Gesellschaft – ÖTG (The Austrian Tribology Society), 2001.