



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI
MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



Fondul Social European
POS DRU 2007-2013



Instrumente Structurale
2007-2013



MINISTERUL
EDUCAȚIEI
CERCETĂRII
TINERETULUI
ȘI SPORTULUI
OIPOSDRU



Universitatea
"POLITEHNICA"
din Timișoara

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA FACULTATEA DE MECANICĂ DEPARTAMENTUL DE MECATRONICĂ

Fiz.med. Mihaela AMARANDEI

CONTRIBUȚII PRIVIND IMPLEMENTAREA INVESTIGAȚIEI TERMOGRAFICE ÎN CERCETAREA DIN DOMENIUL TEHNIC ȘI MEDICAL

**Conducător științific:
Prof.univ.dr.ing. Ioan NICOARĂ**

**2013
TEZA DE DOCTORAT
REZUMAT**

Tehnicile bazate pe termografie sau termoviziune au apărut cu doar câteva decenii în urmă și, pe măsură ce s-au perfecționat, au ocupat o arie tot mai largă de aplicabilitate. Implementarea tehnicilor termografice a început ca aplicație în domeniul militar, s-a extins la uz industrial și, începând din anii 1990, a devenit o metodă de investigare medicală.

Termografia a devenit instrument de lucru în mediul medical numai în urma unui proces de continuă perfecționare și rafinare, atât în aplicarea principiilor, cât și în ceea ce privește metodele de achiziție și prelucrare a imaginilor preluate digital. Acest proces de acumulare, în sensul îmbunătățirii tehnicii, se află în plină dezvoltare la nivel mondial.

Prin această teză s-a arătat că termografia poate fi folosită în scopul de a vizualiza procese nu ca și până acum de a prelua imagini pentru a obține doar forma obiectelor.

Analizând conținutul materialelor cu caracter descriptiv rezultă câteva concluzii importante, și anume:

- tehnica termografică se bazează pe proprietatea corpurilor materiale de a emite radiație în domeniul infraroșu
- distribuția în frecvență și radianță a radiației infraroșii este convertită într-un semnal electric variabil
- la nivel senzorial, radiația termică este percepută ca fiind căldură, pentru care parametrul de stare măsurabil este temperatura
- variația semnalului electric, prin asocierea convențională cu o scară sau o paletă de culori, permite generarea unei imagini sesizabile în domeniul vizibil, care reproduce distribuția termică a obiectului vizat
- imaginea termică a obiectelor are deja multiple aplicații, care includ domenii diverse printre care astronomia, meteorologia, medicina, tehnica aeronautică, tehnica militară, verificarea calității în procese industriale și altele
- pentru toate exemplele de utilizare existente trebuie remarcat aspectul important că imaginea termografică furnizează instantanee ale unor procese naturale sau tehnice prin convertirea unei distribuții de temperatură într-o distribuție de culoare. În acest mod, termografia extinde posibilitatea observatorului uman de a sesiza distribuția radiației în frecvență și

iradianță în afara domeniului vizibil pentru care este înzestrat cu un receptor natural. Această ultimă observație atrage atenția asupra faptului că, în prezent, termografia este limitată la preluarea unor imagini statice sau dinamice ale unor scene extinse, pentru care se urmărește doar variația locală sau/și în timp a temperaturii. Imaginile sunt doar mărturii ale unor stări de fapt. Termografia, în prezent, este utilizată în foarte mică măsură pentru studierea și explicarea fenomenelor care determină modificarea temperaturii.

Echipamentele ce funcționează pe principiul termoviziunii se bazează pe conversia radiației infraroșii (din domeniul termic) în semnal de ieșire de tip imagine. Aceste echipamente se pot clasifica cel puțin în două categorii distincte, astfel:

- echipamente cu răcirea sistemului de detectori;
- echipamente fără răcirea sistemului de detectori;

Camerele de termoviziune moderne se bazează pe o matrice detectoare bidimensională care generează semnale electrice atunci când sunt expuse la energie termică. Matricea de detectori este expusă într-un timp bine stabilit, denumit timpul de expunere sau timp de integrare, iar semnalul analogic generat de fiecare pixel este convertit în semnal digital. Detectorii, după principiul de funcționare se pot împărți în detectori termici (microbolometre) și detectori cuantici.

Prin urmare, echipamentele de termoviziune se bazează pe contrastul termic pe care îl prezintă obiectele în raport cu mediul în care se află (fundal), când au o temperatură sau emisivitate diferită de aceea a mediului în cauză.

Dezvoltarea acestui tip de echipament s-a realizat într-un timp destul de scurt, cu performanțe foarte mari și cu domenii de utilizare dintre cele mai diverse. Cercetările viitoare se canalizează în special pe îmbunătățirea performanțelor și extinderea domeniilor de utilizare a acestei tehnologii.

Având în vedere cele de mai sus, scopul major al prezentei teze este *extinderea aplicațiilor termografiei în domeniul cercetării proceselor fizice sau/și chimice, respectiv extinderea utilizării sale de la domeniul macro la domeniul micro în medicină și industrie*. La nivel macroscopic, termografia translatează imaginea termică în domeniul vizibil sau înlătură inconveniente cum ar fi absența luminii pe timp de nopate sau caracterul opac în vizibil al unor compuși chimici. La nivel microscopic, imaginea termografică își pierde semnificația tradițională de copie a formei și culorii obiectelor dintr-o scenă și devine un

instrument de cercetare a stărilor fizice sau chimice în diverse procese, aplicația tehnică intrând în domeniul non-imaging.

Din multitudinea de direcții spre care se poate îndrepta cercetarea în acest sens, teza își propune următoarele obiective punctuale:

- *perfecționarea procedurilor stomatologice care utilizează materiale fotopolimerizabile, în scopul înlăturării complicațiilor post-restaurare a molarilor*
- *studiul camerelor de fotopolimerizare folosite în stomatologie în scopul determinării variației de temperatură la nivelul materialului fotopolimerizat și la nivelul cavității pulpare*
- *desfășurarea unui studiu de eficiență, biocompatibilitate și fiabilitate a ligamentului artificial încrucișat al articulației genunchiului*
- *introducerea termografiei în tehnica de încercare a materialelor, în scopul determinării caracteristicilor mecanice ale acestora printr-un procedeu neconvențional, care să permită observații mai detaliate și mai profunde privind comportarea materialelor*
- *implementarea termografiei într-un proces industrial de control al calității pieselor mecanice.*

În domeniul medical, pe lângă îmbunătățirea performanțelor de vizualizare și reducerea dimensiunilor de gabarit, o direcție de cercetare, destul de greu de atins, este punerea în aplicabilitate a termografiei în investigații mai profunde, prin folosirea ei de a vizualiza și analiza procese și nu structură, ca de exemplu partea de aplicabilitate din stomatologie. Aici, nu am folosit tehnica termografică de a vizualiza molarul, ci pentru a vedea ce se întâmplă în timpul procesului de fotopolimerizare la nivelul celor două zone de interes, material respectiv camera pulpară.

În domeniul industrial, termografia reprezintă un atu important în depistarea problemelor de proces, pentru evitarea reparațiilor costisitoare sau a opririlor neplanificate ale instalațiilor și în special pentru reducerea costurilor de logistică în cazul montării și demontării repetate a unor piese fabricate, ca de exemplu în cap.3 aplicația din cadrul firmei Kathrei unde prin termografie s-a depistat mașina ce nu funcționa la parametrii termici corespunzători, chiar dacă cei mecanici erau bine setați.

Acestui subiect îi sunt dedicate zeci de articole științifice dar toate pe partea de imagistică și utilizare în scopul de a vedea forma obiectului studiat, nu în scopul de vizualizare de procese.

Cercetările din acest domeniu au început abia în anii 1990, odată cu explozia diagnosticării pacienților cu cancer. Acest fapt a permis dezvoltarea termografiei în scopul de imagistică și nu de proces. La ora actuală se lucrează în mai multe direcții și se speră a se ajunge la un nivel foarte avansat.

Lucrarea de față se încadrează în acest domeniu în plină dezvoltare și inovație prin faptul că aduce o contribuție majoră materializată printr-o propunere proprie asupra unui metode de vizualizare și testare a unor procese tehnologice atât în medicină cât și în industrie.

Mai mult de atât, datorită faptului că oferă o sintematizare a studiului actual al cercetării în domeniul termografic, teza de doctorat aduce un plus real de valoare în noastră, unde fenomenul termografic este foarte puțin abordat.

Teza de doctorat este structurată pe cinci capitole la care se adaugă un capitol de bibliografie concis structurată.

După analiza oportunităților lucrării și a obiectivelor urmărite se prezintă în **Capitolul 2** stadiul actual al cercetării în domeniul termografic. După expunerea unor generalități de natură teoretică a radiației în infraroșu, se sintetizează fenomenul de formare a imaginii utilizând sistemele de termoviziune, prin prezentarea aspectelor teoretice privind emisia, propagarea și detecția radiației electromagnetice din domeniul infraroșu, a elementelor și proceselor ce contribuie la formarea imaginii, iar în partea a doua modelele de evaluare a fenomenului de detecție și modelele de evaluare a caracteristicilor de performanță specifice sistemelor de termoviziune. Prin structura sa, lucrarea abordează aspecte de testare a echipamentelor de termoviziune utilizate, în principal, în domeniul medical și industrial. La sfârșitul capitolului se face o enumerare amplă a tuturor domeniilor de folosire a termografiei, după care se trece la o analiză amănunțită a camerelor de termografiei discutându-se în detaliu camera FLIR A40M. Acest capitol, prin conținutul său în informații și prin modul științific și coerent de prezentare, lucrarea se adresează atât studenților și utilizatorilor de sisteme de termoviziune, cât și cercetătorilor și cadrelor didactice în formare.

Capitolul 3 prezintă două aplicații ale investigațiilor termografice în studiul unor materiale folosite frecvent în medicină. Prima parte a capitolului se referă la optimizarea parametrilor de proces ai procedurii de restaurare dentară cu materiale compozite. Este prezentată o descriere succintă a elementelor de anatomie și de știință a materialelor implicate în procesul vizat. Cercetarea desfășurată a propus utilizarea pentru prima dată a termografiei. Experimentul propus a urmărit măsurarea temperaturii la nivelul materialului

de restaurare, respectiv la nivelul cavității pulpare în timpul procesului de fotopolimerizare cu ajutorul tehnicii termografice și evaluarea diferenței de temperatură transferată funcție de valorile parametrilor de proces. Această măsurare termografică este prima de genul acesta deoarece în articole de specialitate sau site-uri acreditate nu am găsit astfel de studii.

Partea a doua a capitolului este dedicată studiului ligamentelor artificiale folosite în ortopedie. În această parte experimentală s-au realizat încercări la tracțiune asupra firelor care intră în compoziția unui ligament cât și asupra unui ligament utilizat în prezent în implantologie în scopul de a cunoaște cauzele ruperii acestora într-un timp scurt de la implantare. S-a vizualizat termografic deoarece diferențele de temperatură duc la degenerări ale țesutului și de aici la inflamații și bursite. Tot prin metodă termografică s-a aratat că ruptura ligamentară se produce din interior către exterior, astfel înlăturându-se supoziția unei ruperi bruște și violente a ligamentului artificial în interiorul articulației. Toate datele experimentale reprezintă cercetări importante în crearea unei noi generații de ligament artificial.

În **Capitolul 4** se prezintă două aplicații ale investigațiilor termografice în studiul unor aplicații în domeniul industrial. Prima parte a capitolului se referă la rezolvarea și soluționarea unor probleme de producție în cadrul firmei Kathrein România ce are ca obiectiv de activitate producția de antene de comunicații mobile, antene de recepție terestră, antene de broadcast și antene comerciale de recepție terestră. În cadrul firmei Kathrein s-a determinat prin metodă termografică de ce una din cele trei mașini de lipire prin inducție permitea un procentaj mare de rebuturi ale antenelor după montarea acestora. Astfel, poziționarea ansei în plan orizontal influențează în mai mare măsură distribuția temperaturilor decât poziționarea în plan vertical. Dacă înainte de măsurători poziționarea ansei se făcea în mod ochiometric, fapt ce ducea la o lipire necorespunzătoare, după experiment s-a demonstrat importanța poziționării ansei într-un mod cât mai exact. Ca urmare a observațiilor din acest raport s-a realizat un dispozitiv optoelectronic de centrare prin care poziționarea în înălțime a ansei se face exact față de centrul de lipire a cablului coaxial în conector.

Partea a doua a capitolului este dedicată studiului termografiei tranzientă activă cu pulsuri lungi pentru identificarea și evaluarea defecte de mărimi și adâncimi diferite într-un bloc de NECURON 1001. S-a dovedit că ciclurile de încălzire sunt mai eficiente în obținerea de informații legate de defectele materialelor. Toate găurile au fost vizibile cu camera IR în decursul ciclurilor de încălzire, spre deosebire de ciclurile de răcire, când s-au putut identifica doar 90% din defecte. Rezultatele au fost simulate prin metoda elementului

finit în Abaqus pentru a vizualiza distribuția câmpului termic și în interiorul structurii materialului.

Capitolul 5 al lucrării cuprinde concluziile și principalele contribuții originale ale autorului.

Elaborarea lucrării a reprezentat o permanentă conlucrare între autor și conducătorul științific, domnul prof.univ.dr.ing. Ioan NICOARĂ, alături de prof.dr.ing. Liviu MARȘAVINA și conf.dr.ing. Corina GRUESCU care și-au arătat disponibilitatea pe tot parcursul stagiului de pregătire, oferind reperele esențiale pentru realizarea unei cercetări teoretice complexe și pentru aplicarea unei analize integrate a metodelor de calcul utilizate.

Cercetările din domeniul termografic sunt de mare actualitate. La ora actuală nu există o abordare acceptată în ceea ce privește aplicarea termografiei ca și metodă de vizualizare a proceselor atât în industrie cât și în medicină

Lucrarea de față scoate în evidență folosirea termografiei în vizualizarea și analiza de procese în domeniul medical și industrial.

Din multitudinea de direcții spre care se poate îndrepta cercetarea în acest sens, teza și-a propus următoarele obiective punctuale:

- *perfecționarea procedurilor stomatologice care utilizează materiale fotopolimerizabile, în scopul înlăturării complicațiilor post-restaurare a molarilor*
- *studiul camerelor de fotopolimerizare folosite în stomatologie în scopul determinării variației de temperatură la nivelul materialului fotopolimerizat și la nivelul cavității pulpare*
- *desfășurarea unui studiu de eficiență, biocompatibilitate și fiabilitate a ligamentului artificial încrucișat al articulației genunchiului*
- *introducerea termografiei în tehnica de încercare a materialelor, în scopul determinării caracteristicilor mecanice ale acestora printr-un procedeu neconvențional, care să permită observații mai detaliate și mai profunde privind comportarea materialelor*
- *implementarea termografiei într-un proces industrial de control al calității pieselor mecanice.*

În urma cercetărilor efectuate în domeniul termografiei și ale aplicațiilor prezentate în lucrarea de față, se trag următoarele concluzii:

- în principal, termografia exploatează proprietatea corpurilor de a emite radiații în domeniul infraroșu. Aplicabilitatea largă este asigurată de faptul că orice corp la temperatură diferită de 0K emite un spectru de radiații, care include într-o măsură mai mare sau mai mică și domeniul infraroșu.
- deși pe întreg spectrul electromagnetic radiația este descrisă de aceleași legi, este discutată separat radiația termică, ca denumire distinctivă pentru radiația în domeniul infraroșu, radiație de interes în termografie. Radiația termică prezintă particularitatea de a fi sesizată de către observatorul uman prin variația temperaturii, așa cum radiația în domeniul vizibil, sau lumina, este percepută ca variație de culoare.
- descrierea principală a camerei termografice și analiza comparativă detaliată a soluțiilor de produse din oferta pieței de profil.
- prezentarea construcției, modul de funcționare și caracteristicile tehnice ale camerei FLIR A40M, care urmează să fie utilizată în determinările experimentale.
- descrierea utilizărilor termografiei, care acoperă cele mai variate domenii de activitate
- tehnica termografică se bazează pe proprietatea corpurilor materiale de a emite radiație în domeniul infraroșu
- distribuția în frecvență și radianță a radiației infraroșii este convertită într-un semnal electric variabil
- la nivel senzorial, radiația termică este percepută ca fiind căldură, pentru care parametrul de stare măsurabil este temperatura
- variația semnalului electric, prin asocierea convențională cu o scară sau o paletă de culori, permite generarea unei imagini sesizabile în domeniul vizibil, care reproduce distribuția termică a obiectului vizat
- imaginea termică a obiectelor are deja multiple aplicații, care includ domenii diverse printre care astronomia, meteorologia, medicina, tehnica aeronautică, tehnica militară, verificarea calității în procese industriale și altele
- pentru toate exemplele de utilizare existente trebuie remarcat aspectul important că imaginea termografică furnizează instantanee ale unor procese naturale sau tehnice prin convertirea unei distribuții de temperatură într-o distribuție de culoare. În acest mod, termografia extinde posibilitatea observatorului uman de a sesiza distribuția radiației în frecvență și iradianță în afara domeniului vizibil pentru care este înzestrat cu un receptor natural. Această ultimă observație atrage atenția asupra faptului că, în prezent, termografia este limitată la preluarea unor imagini statice sau dinamice ale unor scene extinse, pentru

care se urmărește doar variația locală sau/și în timp a temperaturii. Imaginile sunt doar mărturii ale unor stări de fapt. Termografia, în prezent, este utilizată în foarte mică măsură pentru studierea și explicarea fenomenelor care determină modificarea temperaturii.

- din punct de vedere al materialului compozit, lampa de fotopolimerizare cu halogen încălzește cel mai mult materialul, iar lampa cu LED produce cele mai mari fluctuații. Lampa cu plasmă este cea mai indicată deoarece creșterea temperaturii se produce doar cu un maxim de 5°C, iar scăderea temperaturii este lină într-o durată de timp scurtă (30 de secunde față de 100 de secunde la lampa halogen)
- stabilirea influenței temperaturii la nivelul cavității pulpare este, însă, mai importantă deoarece interesează preponderent efectele biologice. Lampa cu plasmă este cea mai convenabilă, atât în ceea ce privește amplitudinea, cât și durata efectului termic
- cel mai important parametru de proces în fotopolimerizarea materialelor compozite este iradianța fasciculului incident. Cu cât acest parametru este mai ridicat, cu atât fenomenul de inițiere a polimerizării este mai uniform activat în masa monomerică. Polimerizarea efectivă are loc într-un interval de timp scurt, suficient de scurt încât fenomenele termice să nu fie importante. Deși cantitatea de energie incidentă local este foarte ridicată, rapiditatea procesului util limitează mult manifestarea fenomenelor termice, care sunt mai lente. Din punctul de vedere al mărimii iradianței, lampa de fotopolimerizare cea mai recomandabilă este cea cu plasmă
- timpii de expunere efectivă la radiație nu diferă substanțial, ca ordin de mărime, astfel încât acest parametru poate fi considerat important doar ca variabilă globală a procedurii, care poate intra în discuție la comparația cu alte proceduri de restaurare dentară
- din punct de vedere biologic, fotopolimerizarea rapidă cu iradianță ridicată este, de asemenea favorabilă în cazul lămpii cu plasmă. Țesuturile adiacente cavității de umplere sunt minim afectate termic și nu sunt supuse unor fluctuații termice
- ruptura ligamentară se produce din interior către exterior, astfel înlăturându-se supoziția unei ruperi bruște și violente a ligamentului artificail în interiorul articulației.

Pe parcursul prezentului capitol printre contribuțiile personale se pot enumera următoarele:

- sinteza bibliografică a unor materiale interdisciplinare și analiza critică a conținutului acestora, astfel încât să fie sesizate aspectele generatoare de direcții de cercetare.
- proiectarea unui experiment „in vitro” de investigare în domeniul stomatologiei

- propunerea, în premieră, a utilizării tehnicii termografice în măsurarea temperaturii la nivelul materialului compozit și al cavității pulpare
- desfășurarea unui program experimental, care a utilizat 42 de probe dentare, 3 tipuri de lămpi de fotopolimerizare și o cameră termografică performantă
- stabilirea parametrilor de proces (puterea radiantă, iradianța și timpul de expunere) și a influenței acestora asupra temperaturii materialului restaurator, respectiv camerei pulpare
- măsurarea dinamică a temperaturii în timpul procesului de fotopolimerizare, înregistrarea grafică a variației temperaturii și interpretarea rezultatelor numerice și grafice
- urmărirea interacțiunii termice polimer – cameră pulpară atât în timpul fotopolimerizării cât și după încetarea procesului
- stabilirea criteriului de optimizare a procesului de fotopolimerizare prin limitarea la 6°C a creșterii de temperatură în camera pulpară
- declararea iradianței ca principal parametru de proces și recomandarea lămpii cu plasmă ca instrument optim pentru procedura medicală
- elaborarea unor discuții cu caracter comparativ și critic relevante pentru medicul stomatolog
- studiul ligamentului artificial din punct de vedere mecanic prin comparație cu datele termice;
- studiul chimic și microscopic al ligamentelor LARS;
- crearea unor noi direcții prin caracterizare de material din punct de vedere mecanic spre crearea unei noi generații de ligament
- propunerea, în premieră, a utilizării tehnicii termografice în măsurarea parametrilor de proces în cazul lipirii prin inducție
- desfășurarea unui program experimental, în cadrul firmei Kathrei
- stabilirea parametrului de temperatură în procesul de lipire prin inducție și influența acesteia în cazul în care are o valoare fluctuantă
- cercetarea experimentală la firma Kathrein, cercetare care contribuie la corectarea unor tehnologii practicate la execuția antenelor de telefonie mobilă
- conceperea unui raport despre importanța poziționării ansei pe plan orizontal în timpul procesului de lipire
- în urma raportului, firma Kathrei a realizat un dispozitiv optoelectronic de centrare prin care poziționarea în înălțime a ansei se face exact față de centrul de lipire a cablului coaxial în conector.

- realizarea unui stand pentru testarea termică a unui poliuretan numit comercial Necuron 1001
- compararea fișei tehnice date de producător cu datele experimentale rezultate în cadrul laboratorului Universității Politehnica Timișoara
- determinarea temperaturii maxime pentru Necuron la care poate fi supus acesta, rezultând o valoare mult mai mare decât cea dată de producător
- demonstrarea vizualizării termografice a defectelor prin procedeu de încălzire / răcire
- obținerea caracteristicii de material din punct de vedere al rezistenței la tracțiune, încovoiere și compresiune în cadrul Universității de Studii din Firenze, Italia
- probele în cadrul testelor au fost cu defect și fără defect în scopul de a vedea dacă defectele influențează distribuția de forțe.

Având în vedere cele de mai sus, scopul major al prezentei teze este extinderea aplicațiilor termografiei în domeniul cercetării proceselor fizice sau/și chimice, respectiv extinderea utilizării sale de la domeniul macro la domeniul micro. La nivel macroscopic, termografia translatează imaginea termică în domeniul vizibil sau înlătură inconveniente cum ar fi absența luminii pe timp de nopate sau caracterul opac în vizibil al unor compuși chimici. La nivel microscopic, imaginea termografică își pierde semnificația tradițională de copie a formei și culorii obiectelor dintr-o scenă și devine un instrument de cercetare a stărilor fizice sau chimice în diverse procese, aplicația tehnică intrând în domeniul non-imaging.

Directii viitoare de cercetare:

- dezvoltarea unor aplicatii industriale pe baza metodologiei dezvoltate pentru determinarea defectelor in anumite structuri
- vizualizarea si monitorizarea aplicatiilor industriale prin metoda termografica
- utilizarea termografiei in monitorizarea proceselor de productie
- crearea unui nou design al ligamentului artificial pe parte de interior pentru a imbunatati rezistenta acestuia
- testarea lampilor de fotopolimerizare folosite in stomatologie din punctul de analiza a altor parametrii fizici.