

## Determinarea stării de tensiune și deformație în plăcile cu circuite imprimate

### Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie Mecanică

**autor ing. Alexandru Falk**

conducător științific Prof.univ.dr.ing.Liviu Marșavina și Prof.univ.dr.ing. Ioan Octavian Pop

luna 11 anul 2022

În ultimii ani, dezvoltarea rapidă a industriei electronice globale a crescut treptat cererea pieței de produse electronice cu funcții diverse, astfel plăcile de circuit imprimat (PCB-uri) trebuie instalate cu mai multe caracteristici sau miniaturizate fără a sacrifica funcționalitatea. Restricționând utilizarea materialelor de lipit convenționale ce conțin plumb, acestea au fost înlocuite cu aliaje Sn-Ag Cu (SAC) fără plumb care sunt mai fragile. Coeficienții de expansiune termică (CTE) ale diferitelor materiale de pe PCB conduc la variația nivelului de expansiune termică, ceea ce duce la apariția tensiunilor și deformațiilor specifice. În plus, procesele de testare și de asamblare a carcaselor pot induce tensiuni suplimentare în PCB, provocând fisuri în pasta de sudură. Principalele componente afectate sunt microprocesoarele datorită modului în care sunt lipite pe PCB-uri cu ajutorul unor bile din pastă de sudură (BGA - Ball grid array), Huang et al. (2011), Huang et al. (2016), Sitek et al. (2004), Huang (2015).

De aceea controlul deformațiilor specifice pe PCB-uri este foarte importantă, în prezent limita utilizată în industria automotive conform IPC JEDEC-9704 fiind de 700 microstrain ( $\mu\text{m/m}$ ) (deformația specifică exprimată în termeni de părți pe milion,  $10^{-6}$ ) pentru PCB-ul utilizat în acest studiu cu o grosime de 1.6mm.

În prezent se folosește metoda de măsurare cu mărci tensometrice. Această metodă permite determinarea deformațiilor specifice numai în anumite puncte. Însă este important să se cunoască distribuția deformațiilor specific pe întreaga suprafață a PCB-ului pentru a evita poziționarea componentelor electronice critice cum ar fi microprocesoarele. Din acest motiv a fost aleasă o nouă metodologie de determinare a deformațiilor specifice pe întreaga suprafață numită metoda corelării digitale a imaginilor care este o metodă de măsurare optică fără contact.

Astfel, teza de doctorat își propune să aducă în discuție o nouă metodă de determinare a stării de deformație din PCB-uri cu ajutorul corelării digitale a imaginilor, posibilitatea de dezvoltare a unor metodologii de determinare a stării de tensiune și deformație din PCB-uri și validarea unor simulări cu elemente finite. De asemenea cu ajutorul FEA se pot obține informații suplimentare cum ar fi distribuția tensiunii echivalente pe întreaga suprafață a PCB-ului și câmpul singular de tensiune de la interfața PCB-BGA.

În primul capitol, **Introducere** se face pentru început o prezentare a plăcilor cu circuite imprimate (PCB) și rolul acestora. De asemenea se prezintă principalele probleme ce pot apărea și care sunt principale componente afectate care sunt microprocesoarele datorită modului în care sunt lipite pe PCB-uri cu ajutorul unor bile din pastă de sudură (BGA - Ball grid array). Din acest motiv este foarte important să se cunoască distribuția deformațiilor specifice pe întreaga

suprafață a PCB-ului. Apoi se face o trecere în revistă a metodei actuale de măsurare a deformațiilor specifice, metoda tensometriei electrice rezistive, respective metoda corelării digitale a imaginilor este o metodă de măsurare optică fără contact pentru măsurarea deformațiilor specifice pe întreaga suprafață.

Capitolul al doilea, cu titlul ***Stadiul actual privind determinarea deformațiilor în PCB-uri*** prezintă metoda tensometriei electrice rezistive și aplicabilitatea acestei metode pentru determinarea deformațiilor specifice pe PCB-uri. Această metodă permite determinarea deformațiilor specifice numai în anumite puncte.

Pentru măsurarea deformațiilor specifice cele mai utilizate mărci tensometrice utilizate în practică sunt sub formă de rozetă formate din trei mărci tensometrice poziționate la un anumit unghi ( $0^\circ -45^\circ -90^\circ$ ;  $0^\circ -60^\circ -120^\circ$ ), Omega engineering (1999), Intel (2016), Bin and Ueda (2011), IPC (2012), National Instrument (2016).

Conform cu standardul IPC este prezentat modul de dispunere a rozetelor tensometrice pe PCB și modul de pregătire a suprafeței PCB-ului pentru a putea obține rezultate fiabile. Din aplicațiile prezentate s-a putut observa că este foarte important locul în care sunt plasate rozetele tensometrice. Plasând rozeta tensometrică prea aproape de colțul componentei electronice cauzează ca măsurătoarea să fie foarte sensibilă la erori mici de plasare a rozetei tensometrice. Plasând rozeta tensometrică prea departe de colțul componentei electronice duce la reducerea sensibilității la adevărata deformație în colțul componentei. Astfel în cazul microprocesoarelor distanța recomandată de plasare a rozetelor tensometrice fiind  $3.6 \pm 0.5$  mm față de marginile componentei, Intel (2016), Bin, H. and Ueda, T. (2011), Chvojan, J. and Vaclavik, J. (2018).

De asemenea în acest capitol este prezentată și metoda de analiza cu elemente finite (FEA). FEA fiind de mare ajutor pentru a afla zonele în care pot apărea probleme înainte ca produsul să fie construit. Aceste informații sunt folosite pentru a face ajustări ale design-ului produsului pentru a reduce deformația specifică și de a re poziționa anumite componente electronice sensibile (ex. microprocesoarele) dacă este cazul. Conform cu aplicațiile prezentate timpul lung necesar pentru construirea și rezolvarea modelelor nu poate fi justificat atunci când este necesar doar analiza PCB-ului. Astfel pot fi definite modele care utilizează elemente simple de bloc 3D pentru a recrea efectele componentelor, rigiditate și masă adăugată. Multe exemple bune de modele detaliate ale elementelor finite există deja în literatura de specialitate actuală. Dehbi et al. (2005), Gu et al. (2007), Chen et al. (2008), Luan et al. (2006), Shetty et al. (2001), Shetty et al. (2003), Li et al. (2001), Jih et al. (1998), în care complexitatea acestor modele este justificată întrucât este necesară determinarea tensiunilor interne ale componentelor.

Capitolul al treilea, cu titlul ***Determinarea experimentală a deformațiilor specifice***, prezintă configurația de asamblare a PCB-ului utilizată pentru determinarea experimentală a deformațiilor specifice utilizând metoda tensometriei electrice rezistive, respectiv metoda corelării digitale a imaginilor. Au fost considerate două tipuri de încărcare pentru a vedea influența supraîncălzărilor în distribuția deformațiilor specifice principale. În cazul 1 au fost considerate supraîncălzări pe carcasă și pe capac și în cazul 2 fost considerate supraîncălzări doar pe carcasă. PCB-ul este asamblat între carcasă și capac utilizând patru șuruburi M2.5, utilizându-se un cuplu maxim de 0,7Nm.

Măsurătorile din acest capitol au fost realizate în cadrul laboratorului de Mecanică și Rezistența Materialelor al Universității Politehnica Timișoara.

Pentru măsurătorile realizate cu ajutorul mărcilor tensometrice au fost luate în considerare pe PCB trei zone de la colțurile microprocesorului, unde au fost amplasate

rozetele tensometrice și au fost măsurate deformațiile specifice. Rozeta tensometrică utilizată este HBM RF91 cu următoarele caracteristici: rezistență de 120  $\Omega$ , trei mărci tensometrice amplasate la: 0°, 45°, 90°. Achiziția de date a fost făcută cu QuantumX MX1615B și analizată cu software-ul Catman Easy V5.3.1. În urma analizei rezultatelor obținute s-a putut observa că în cazul rozetei tensometrice 1 deformația specifică maximă depășește valoarea admisibilă de 700  $\mu\text{m/m}$ . Acest lucru este cauzat de diferența de nivel produsă de supraînălțarea prezentă în apropierea microprocesorului.

Pentru măsurătorile realizate cu ajutorul metodei corelării digitale a imaginilor, echipamentul folosit pentru captarea și procesarea imaginilor a fost sistemul Dantec Q-400. Cele două camere ale sistemului de corelație Q-400 sunt setate la o rezoluție de 5 megapixeli. Pentru a achiziționa și prelucra în mod corespunzător imaginile, a trebuit să se aplice mai întâi un model de pete aleatoriu pe suprafața PCB-ului. Acest lucru s-a făcut prin aplicarea unei vopsele negre pulverizate peste un strat alb uniform.

Studiile arată că această metodă este folosită conform documentației la o mulțime de aplicații cum ar fi: măsurarea deformațiilor mari Tarigopula și al. (2008), analiza fisurilor Tung și al. (2008), definirea diagramelor ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) pentru noi materiale Mol'kov și Yu (2013), construcții – pentru a evalua anumite deplasări și fisuri Cheng și al. (2017), Li și al. (2017), măsurarea deformațiilor specifice cauzate de variațiile de temperatură Wang și Pan (2016), Ramosa și al. (2015). Pan și al. (2014)., Tekieli și al. (2017), Hild și Roux (2006), Malesa și al (2013).

După capturarea imaginilor, corelarea și analiza s-au făcut cu softul Istra 4D. Analiza deformațiilor specifice a fost realizată în zona de interes (ROI) definită pe suprafața PCB-ului.

În conformitate cu principiul DIC, această regiune a fost împărțită în subseturile mici. Câmpurile de deplasare și deformație specifică au fost calculate în aceste subseturi folosind un algoritm de corelare. Rezultate obținute descriu comportamentul global al PCB-ului. Această analiză relevă că, în „cazul de încărcare 1”, pe suprafața PCB-ului se observă deformații specifice mai mari decât în „cazul de încărcare 2”. Aceste rezultate arată clar influența geometriei carcasei și capacului asupra distribuției deformațiilor specifice. Se poate observa că deformația specifică maximă depășește valoarea de 700  $\mu\text{m/m}$  în zonele cu supraînălțări în ambele cazuri.

Pentru o mai bună înțelegere a rezultatelor au fost utilizate mărci tensometrice optice virtuale (A1-A2, B1-B2, C1-C2, D1-D2) pentru a calcula deformația specifică principală maximă locală și de asemenea pentru a putea compara rezultatele cu rezultatele obținute din măsurătorile realizate cu ajutorul mărcilor tensometrice, respective FEA. Astfel în zona D1-D2 valoarea de 700  $\mu\text{m/m}$  este depășită în ambele cazuri de încărcare, valoarea maximă înregistrată fiind de 1039  $\mu\text{m/m}$  pentru cazul de încărcare 2. Pentru zonele A1-A2, B1-B2 și C1-C2, valorile deformațiilor specifice sunt mai mici de 700  $\mu\text{m/m}$  pentru ambele cazuri de încărcare.

Al patrulea capitol, numit ***Determinarea numerică a deformațiilor specifice de pe PCB***, prezintă rezultatele obținute cu ajutorul modelelor numerice. FEA este de mare ajutor pentru a afla zonele în care pot apărea probleme înainte ca produsul să fie construit. În cazul PCB-urilor aceste informații sunt folosite pentru a face ajustări ale design-ului produsului pentru a reduce deformația specifică și de a re poziționa anumite componente electronice sensibile (ex. microprocesoarele) dacă este cazul.

Pentru analiza cu elemente finite a fost utilizat Software-ul comercial Ansys Workbench 18.1. Pentru a simplifica modelul, componentele electronice au fost considerate blocuri geometrice simple cu un material generic (un plastic dur) atribuit și pentru PCB a fost atribuit în prima simulare un material FR4 cu proprietăți ortotrope determinate experimental de către furnizorul de PCB-uri și, în a doua simulare, un material FR4 din baza de date cu proprietăți de material ale Ansys și carcasa un aliaj de aluminiu. Pentru șuruburi s-au aplicat

condiții la limită sub formă de pretensionare a șurubului de 1800 N echivalent de 0,7 Nm, această valoare este conform cu datele primite de la furnizorul de șuruburi pe baza simulărilor. După efectuarea discretizării a fost obținut un număr total de 80254 elemente tetraedrice, conectate în 266649 noduri.

În urma rezultatelor obținute se poate observa că deformațiile specifice principale maxime sunt localizate în apropierea componentei mari (microprocesor) și în apropierea găurilor de fixare, deformațiile specifice principale maxime sunt peste valoarea admisibilă (700  $\mu\text{m/m}$ ). La fel ca și în cazul metodei corelării digitale a imaginilor, pentru o bună înțelegere a distribuției deformațiilor specifice principale maxime în zona microprocesorului, rezultatele au fost interogate conform cu segmentele A1-A2, B1-B2, C1-C2, D1-D2. Astfel în zona D1-D2 valoarea de 700  $\mu\text{m/m}$  este depășită atât pentru cazul 1 cât și pentru cazul 2, valoarea maximă înregistrată fiind de 1018  $\mu\text{m/m}$  pentru cazul de încărcare 1 și 884 pentru cazul de încărcare 2.

Diferența dintre rezultatele simulărilor cu proprietățile materialului FR4 determinate experimental și proprietățile predefinite în Ansys este sub 2%.

Au fost obținute și rezultatele pentru distribuția tensiunii admisibile pe întreaga suprafață a PCB-ului, astfel s-a putut observa că valoarea tensiunii admisibile de 270 Mpa pentru materialul PCB-ului nu este depășită în ambele cazuri de încărcare.

Capitolul cinci, cu titlul *Influența temperaturii asupra deformării PCB-urilor*, prezintă analiza influenței temperaturii asupra evoluției deformațiilor specifice maxime de pe PCB-uri. Pentru aceasta s-au folosit două metode experimentale, metoda tensometriei electrice rezistive și metoda Corelării Digitale a Imaginilor, completate cu o modelare și simulare numerică prin metoda elementelor finite utilizând soft-ul Ansys Workbench 18.1.

Una dintre principalele cauze ale defecțiunilor în ansamblurile electronice este deformarea termo-mecanică resimțită în timpul expansiunii termice. Defecțiunile, cum ar fi fisuri ale BGA-urilor, traseelor, dezlipirea componentelor sunt provocate de tensiunile termice datorită coeficienților diferiți de expansiune termică. Pentru a prezice fiabilitatea este importantă înțelegerea stării de tensiune și deformație indusă pe PCB datorită variațiilor de temperatură.

Măsurătorile din acest capitol au fost realizate în cadrul laboratorului de Inginerie Civilă și Construcții Durabile Egleton al Universității din Limoges.

Pentru măsurătorile realizate cu ajutorul mărcilor tensometrice au fost luate în considerare pe PCB două zone de la colțurile microprocesorului, unde au fost amplasate rozetele tensometrice și au fost măsurate deformațiile specifice. Configurația experimentală, incluzând PCB-ul, cuptorul și sistemul de achiziție a datelor. Achiziția de date a fost realizată cu sistemul Spider 8 și analizată cu software-ul Catman Easy V5.3.1. Pentru a examina evoluția deformațiilor specifice în funcție de temperatură PCB-ul s-a introdus într-un cuptor iar temperatura a fost modificată în mai mulți pași: 25, 50, 85 și 120 °C. Rozetele tensometrice folosite au fost Kyowa KFGS-1-120-D17-11 (rozetă cu unghi drept) cu următoarele caracteristici: rezistență 120  $\Omega$ , trei mărci tensometrice plasate la 0°, 45° și 90°. Compensarea temperaturii s-a făcut prin introducerea unui PCB nesolicitat în cuptor.

În urma analizei rezultatelor s-a putut observa creșterea deformației specifice principale maxime odată cu creșterea temperaturii. Pe fiecare interval de temperatură la începutul perioadei deformațiile cresc și apoi se stabilizează la finalul intervalului de menținere. Deformația principală maximă depășește limita de 700  $\mu\text{m/m}$  pe parcursul intervalului 3 de temperatură (85 °C).

Pentru măsurătorile realizate cu ajutorul metodei corelării digitale a imaginilor, configurația experimentală a fost compusă din ansamblul PCB, cuptorul și camera CCD. Software-ul utilizat pentru achiziționarea imaginii a fost Trasse ANDRA3 și pentru Corelarea digitală a imaginii Correla dezvoltat de Universitatea din Poitiers. Analiza deformațiilor

specifice a fost realizată în regiunea de interes (ROI) definită pe suprafața PCB-ului. În conformitate cu principiul DIC, această regiune a fost împărțită în subseturile mici. Câmpurile de deplasare și deformație specifică au fost calculate în aceste subseturi folosind un algoritm de corelare. La fel ca și în cazul solicitării mecanice, au fost utilizate mărci tensometrice optice virtuale (A1-A2, B1-B2) pentru a calcula deformațiile specifice locale. Pozițiile mărci tensometrice optice se află în aceeași regiune cu segmentele din analiza elementelor finite și mărcile tensometrice. Ideea este de a compara rezultatele obținute în analiza cu elemente finite cu măsurile experimentale folosind aceeași configurație.

În urma analizei rezultatelor sa putut observa creșterea deformației specifice principale maxime cu creșterea temperaturii pentru fiecare treaptă de temperatură. Deformația principală maximă depășește limita de 700  $\mu\text{m/m}$  pe parcursul intervalului 3 de temperatură (85 °C) în ambele zone interogate.

Pentru analiza cu elemente finite, la fel ca și în cazul modelului folosit la solicitarea mecanică, pentru a simplifica modelul, componentele electronice au fost considerate blocuri simple de geometrie cu un material generic (un plastic dur) atribuit și pentru PCB a fost atribuit material FR4 cu proprietăți ortotropice. Condițiile la limită aplicate sunt: pentru șuruburi s-au aplicat sub formă de pretensionare a șurubului de 1800 N echivalent unui moment de strângere de 0,7 Nm, această valoare este conform cu datele primite de la furnizorul de șuruburi pe baza simulărilor, și temperatura în mai multe etape: 25, 50, 85 și 120 °C

După efectuarea discretizării a fost obținut un număr total de 80254 elemente tetraedrice, conectate în 266649 noduri. Prin rezolvarea modelului cu elemente finite, s-a obținut distribuția deformațiilor specifice principale maxime pe PCB. La fel ca și în cazul metodei corelării digitale a imaginilor, pentru o bună înțelegere a distribuției deformațiilor specifice principale maxime în zona microprocesorului, rezultatele au fost interogate conform cu segmentele A1-A2 și B1-B2. Se observă creșterea deformației specifice principale maxime cu creșterea temperaturii pentru fiecare treaptă de temperatură. Deformația principală maximă depășește limita de 700  $\mu\text{m/m}$  pe parcursul intervalului 3 de temperatură (85 °C) în ambele zone interogate.

Au fost obținute și rezultatele pentru distribuția tensiunii admisibile pe întreaga suprafață a PCB-ului. Se poate observa că valorile maxime ale tensiunii echivalente sunt localizate în apropierea componentei mari (microprocesor) și în apropierea găurilor de fixare. Valoarea maximă a tensiunii echivalente fiind sub valoarea tensiunii maxime admisibile de 270 Mpa în toate cele 4 cazuri de temperatură.

În al șaselea capitol, cu titlul *Analiza rezultatelor obținute*, prezintă compararea rezultatele obținute în cazul solicitărilor mecanice și termice cu cele două metode experimentale, metoda tensometrie electrică rezistivă și metoda Corelării Digitale a Imaginii, respectiv simulare numerică prin metoda elementelor finite.

În cazul solicitării mecanice prin compararea rezultatelor obținute s-a putut observa că rezultatele obținute prin metoda Corelării Digitale a Imaginii se înadrează în limitele rezultatelor obținute din măsurătorile cu mărci tensometrice, respective sunt comparabile cu rezultatele obținute din simulările cu elemente finite. Limita deformațiilor specifice admisibilă de 700  $\mu\text{m/m}$  fiind depășită pentru ambele abordări de evaluare în zona D1-D2.

În cazul solicitării termice s-a putut observa că rezultatele obținute prin metoda Corelării Digitale a Imaginii sunt în bună concordanță cu rezultatele obținute din măsurătorile cu mărci tensometrice. Pentru regiunea 0 (A1-A2 și marca tensometrică 0), diferența maximă de 30,4% este la 50 °C respectiv pentru regiunea 1, diferența maximă de 12,5% este la 50 °C. De asemenea se poate observa că rezultatele obținute prin metoda Corelării Digitale a Imaginii sunt în aceeași interval cu rezultatele obținute din analiza cu elemente finite. Pentru zona A1-A2 se pot observa diferențe ușor mai mari la 50 °C, unde diferența maximă este de

16,8% și la 120 °C este de 14,1%. Pentru zona B1-B2 se pot observa diferențe ușor mai mari la 120 °C, unde diferența maximă este de 22,6%.

În concluziile acestui capitol se poate observa că rezultatele obținute sunt relativ apropiate. Astfel se poate valida metoda corelării digitale a imaginii ca metodă de investigare a deformațiilor în PCB-uri solicitate mecanic și/sau termic. Avantajul acestei metode față de metoda tesometriei electrice rezistive este ca e o metodă non-contact, nemodificând rigiditatea PCB-ului prin atașarea rozetelor tensometrice, respectiv este o metodă “full field” care permite determinarea tensiunilor și deformațiilor pe toată suprafața PCB-ului, în comparație cu măsurătorile tensometrice care dau rezultatele deformațiilor punctual în zona rozetei tesometrice.

Capitolul șapte, cu titlul ***Câmpul singular de tensiune de la interfața PCB-BGA***, prezintă singularitatea câmpului de tensiune de la interfața a doua materiale. Pentru analiza singularității de la interfața PCB-BGA s-a utilizat analiza cu elemente finite și a fost folosit Software-ul comercial Ansys Workbench 18.1. S-a considerat interfața dintre PCB și o bilă de pastă de sudură, iar ca și condiție la limită o deplasare de 0,05mm. Materialele utilizate fiind aceleași ca și în analizele cu elemente finite precedente.

În urma analizei cu elemente finite, s-a obținut distribuția tensiunii maxime pe întreaga suprafață a bilei. De unde s-a putut observa că valorile maxime ale tensiunii apar la începutul creșterii interfeței dintre PCB și pasta de sudură. Pentru a evidenția comportarea de la extremitatea interfeței s-au interogată rezultatele tensiunilor în funcție de distanța  $r=0,02\text{mm}$  pentru cinci valori diferite ale unghiului  $\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  și  $90^\circ$ . Reprezentând la scara logaritmică variațiile tensiunilor în funcție de distanța  $r$  și realizând o interpolare liniară a graficului  $\log \sigma = f(\log r)$  panta dreptei este egală cu  $\lambda-1$ , s-a obținut o valoare medie a ordinului singularității  $\lambda_{med} = 0.48$ . Cu ajutorul mathcad (Anexa 1) s-a calculat valoarea analitică a singularității câmpului de tensiune, obținându-se o valoare de 0,474.

În al optulea capitol, de ***Concluzii și contribuții personale***, au fost prezentate concluziile generale, contribuțiile personale și câteva perspective de dezvoltare ulterioară a cercetărilor întreprinse în cadrul tezei de doctorat.

Rezultatele obținute au fost diseminate în cadrul mai multe lucrări științifice, indexate Web of Science-WoS (ISI):

1. A. Falk, L. Marsavina, O. Pop, “Analysis of Printed Circuit Boards strains using finite element analysis and digital image correlation”, FRATTURA ED INTEGRITA STRUTTURALE, Vol. 51, pp.541-551, Ian. 2020 (WOS:000502844600041)
2. A. Falk, L. Marsavina, O. Pop, J. Dopeux “Assessment of Strains Produced by Thermal Expansion in Printed Circuit Boards”, Materials, Vol. 15(11), art. 3916, Mai 2022 (WOS:000809023200001)
3. A. Falk, L. Marsavina, O. Pop, “Experimental determination of strain distribution on Printed Circuit Boards using Digital image correlation”, 25th International Conference on Fracture and Structural Integrity, Vol. 18, pp. 214-222, 2019 (WOS:000504238000023)

## Bibliografie

- Bin, H. and Ueda, T. , 2011, Investigation on the optimum sampling rate of strain measurement during printed circuit board (PCB) system assembly, 13th Electronics Packaging Technology Conference p.579-584
- Chen Y, Wang C, Yang Y., 2008, Combining vibration test with finite element analysis for the fatigue life estimation of PBGA components. *Microelectron Reliab*;48(4):638–44.
- Cheng, J.-L., Yang, S.-Q., Chen, K., Ma, D., Li, F.-Y., & Wang, L.-M., 2017, Uniaxial experimental study of the acoustic emission and deformation behavior of composite rock based on 3D digital image correlation (DIC). *Acta Mechanica Sinica*, 33(6), 999–1021.
- Chvojan J. and Vaclavik J., 2018, PCB Tests during Assembly and Splitting, *Proceedings*, 2, 472
- Dehbi A, Ousten Y, Danto Y, Wondrak W. , 2005, Vibration lifetime modelling of PCB assemblies using Steinberg model. *Microelectron Reliab*;45(9–11):1658–61.
- Gu J, Barker D, Pecht M., 2007, Prognostics implementation of electronics under vibration loading. *Microelectron Reliab*;47(12):1849–56.
- Hild, F., Roux, S., 2006, Digital Image Correlation: from Displacement Measurement to Identification of Elastic Properties – a Review, *Journal compilation* 42 p.69-80
- Huang C.Y. , Lin Y.H. , Ying K.C., Ku C.L., 2011, The solder paste printing process: critical parameters, B27+B1:B21+B1:B23+B27+B1:B21+B1:B24+B1:B22+B1:B21+B1:B22
- Huang C.Y. , . Chen C.H, Lin Y.H., 2016, A grey-ANN approach for optimizing the QFN component assembly process for smart phone application, *Solder. Surface Mount Technol.* 28 (2) 63–73."
- Huang C.Y., 2015, Innovative parametric design for environmentally conscious adhesive dispensing process, *J. Intell. Manuf.* 26 (1) 1–12.
- Intel, 2016 Intel Strain Measurement methodology for Circuit Board Assembly- Board Flexure Initiative (BFI)
- IPC, IPC JEDEC 9704A, 2012
- Jih E, Jung W., 1998, Vibrational fatigue of surface mount solder joints, ITherm'98. In: Sixth intersociety conference on thermal and thermomechanical phenomena in electronic systems (Cat. No. 98CH36208),. p. 246–50.
- Li R., 2001, A methodology for fatigue prediction of electronic components under random vibration load. *ASME J Electron Packag*, 123(4):394–400
- Luan J, Tee TY, Pek E, Lim CT, Zhong Z, Zhou J., 2006, Advanced numerical and experimental techniques for analysis of dynamic responses and solder joint reliability during drop impact. *IEEE Trans Compon Packag Technol*;29(3):449–56.
- Malesa, M., Malowany, K. , Tomczak, U., Siwek, B. , Kujawinska, Lewandowska, A. S., 2013, Application of 3D digital image correlation in maintenance and process control in industry, *Computers in Industry* 64 p.1301-1315
- Mol'kov, V., Yu, , 2013, Application of the method of digital image correlation to the construction of stress strain diagram, Vol. 48, No. 6 p.832-837
- National Instrument, 2016, Engineer's Guide to Accurate Sensor Measurements (National Instrument)
- Omega engineering, 1999, Practical Strain Gage measurements
- Pan, B., Yuan, J., Xi, Y. , 2014, Strain field denoising for digital image correlation using a regularized cost function, *Optics and Lasers in Engineering* 65 p.9–17
- Ramosa, T., Furtado, A., Eslami, S., Alves, S., Rodrigues, H., Arêde, A., Tavares, P. J. , Moreira, P. M. G. P., 2015, 2D and 3D Digital Image Correlation in Civil Engineering – Measurements in a Masonry Wall, *Procedia Engineering* 114 p.215-222
- Shetty S, Lehtinen V, Dasgupta A, Halkola V, Reinikainen T., 2001, Fatigue of chip scale

package interconnects due to cyclic bending. *ASME J Electron Packag*,123(3):302–8.

Sitek J., Rocak D. , Bukat K. , 2004, A comparison of the quality of lead-free solder pastes, *Solder. Surface Mount Technol.* 16 (2) 22–30."

Tarigopula V., Hopperstad O.S., Langseth M., Clausen A.H., Hild F., Lademo O.-G., Eriksson M., 2008, A Study of Large Plastic Deformations in Dual Phase Steel Using Digital Image Correlation and FE Analysis, *Experimental Mechanics* 48:181–196

Tekieli, M., De Santis,S., de Felice,G., Kwiecien,A., Roscini,F., 2017, Application of Digital Image Correlation to composite reinforcements testing, *Composite Structures* 160 p.670–688

TUNG, S.H., SHIH, M.H, SUNG, W.P., 2008, Development of digital image correlation method to analyse crack variations of masonry wall, *Sadhana* Vol. 33, Part 6 p.767-779

Wang, B., Pan, B., 2016, Subset-based local vs. finite element-based global digital image correlation: A comparison study, *Theoretical & Applied Mechanics Letters* 6 p.200-208