

CERCETĂRI PRIVIND DURATA DE VIAȚĂ A PASTEI DE LIPIT ÎN CAZUL COMPONENTELOR MONTATE LA SUPRAFAȚĂ

Teză de doctorat - Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat inginerie mecanică

autor ing. Iulia - Eliza Ținca

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Arjana Davidescu

luna__ anul 2023

1 Introducere

În timpul duratei lor de viață, dispozitivele electronice sunt supuse unor variații de temperatură cu schimbare lentă - cicluri termice în Figura 1 (b), variații de temperatură cu schimbare rapidă - cicluri de șoc termic și cicluri de vibrații. Defecțiunile induse de ciclurile termice, cum ar fi fisurile în bilele de lipit, prezentate în Figura 1 (a, c), reprezintă o preocupare predominantă în materie de fiabilitate [1]. Diferențele de dilatare termică dintre componentele electronice și PCB-uri conduce la apariția de tensiuni și deformări în îmbinările de lipit. Ca urmare, îmbinările de lipit răspund prin deformare plastică dependentă de timp, care se acumulează, conducând în cele din urmă la apariția fisurilor, ca în cazul Figura 1 (c), și la funcționarea defectuoasă a produsului. În întreaga industrie electronică, problemele legate de îmbinările de lipit cauzează 13% din defecțiuni [2], iar condițiile de temperatură ridicată și ciclurile de temperatură reprezintă principalul motiv [1]. În ultimii douăzeci de ani, odată cu creșterea complexității vehiculelor, numărul de rechemări în service ale automobilelor s-a dublat, iar în 2015, electronicele au acoperit 6 % din rechemările în service ale vehiculelor. În plus, conducerea autonomă impune o mentenanță de zero defecte, ceea ce subliniază necesitatea îmbunătățirii strategiei de calitate, axată pe prevenirea și eliminarea defectelor [3].

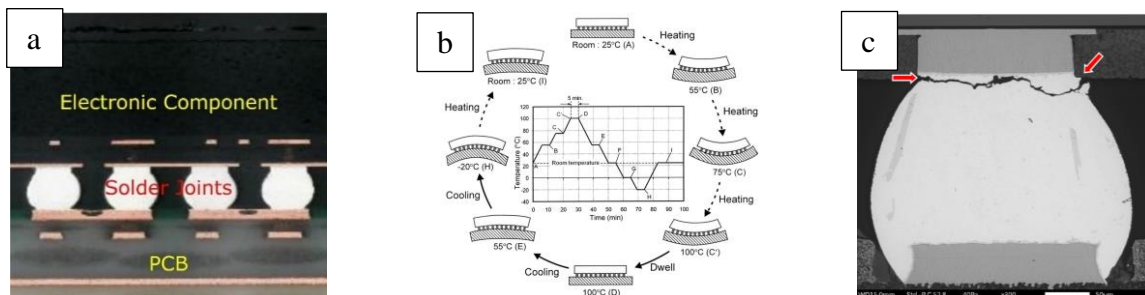


Figura 1 Secțiune transversală a unei piese electronice montate pe o placă de circuit imprimat (a). Ilustrație a deformării unui ansamblu CI - PCB în timpul ciclurilor termice. Reproducere cu permisiunea lui S. Cho, ASME Journal of Electronic Packaging, 2004, vol. 126(1): 41-47 [4] (b). Fisura de oboseală a îmbinării de lipitură. Imagine utilizată prin amabilitatea Continental AG (c).

Motivația pentru această lucrare provine din necesitatea unei strategii de îmbunătățire continuă a calității în dezvoltarea de componente electronice pentru conducerea autonomă. Producătorii de componente electronice își testează produsele pe baza standardelor actuale [5]

și pentru utilizarea lor preconizată prin testarea fiabilității la nivel de placă (BLR). Cu toate acestea, într-o placă de circuit imprimat care face parte dintr-un produs (sau sistem), starea de tensiune din îmbinările de lipit se modifică din cauza unor sarcini suplimentare, cum ar fi fixările [6] [7]. Tensiunea mecanică crescută poate accelera defectarea îmbinărilor sudate.

Metodologia propusă implică determinarea duratei de viață pe cale experimentală, analitică și numerică la nivel de placă. Scopul este de a dezvolta un flux de lucru standardizat de simulare pentru evaluarea predictivă a fiabilității la nivel de sistem (SLR).

2 Stadiul actual al cercetării

Dudek [8] definește două abordări fundamentale în evaluarea fiabilității îmbinărilor sudate: abordări teoretice și experimentale.

Scopul testului de fiabilitate este de a obține defecțiuni pe un număr statistic semnificativ de eșantioane și de a determina distribuția duratei de viață. Distribuția statistică a defecțiunilor lipiturilor urmează o distribuție Weibull cu doi parametri definită de parametrul de scară, θ , și de parametrul de pantă sau de formă, β . Testele de calificare evaluează dacă un produs trece sau nu un anumit prag de testare. Acestea au o durată predefinită și au ca scop calificarea unui anumit proiect. Testele de calificare includ un volum mai mic al eșantionului decât testele de fiabilitate și nu acceptă eșecuri [9]. În mod obișnuit, testele de fiabilitate a lipiturilor iau în considerare diferite profiluri de temperatură accelerată într-un test termic accelerat (ATC).

Abordarea teoretică de evaluare a fiabilității la nivel de placă utilizează un model de oboseală pentru a prevedea defectarea îmbinărilor de lipit. *Modelul Engelmaier - Wild* [10] în (1) estimează durata medie de viață la oboseală a componentelor fără plumb luând în considerare intervalul de deformare ciclică totală de forfecare plastică a lipiturii după relaxarea completă.

$$N_f = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta\gamma}{2\varepsilon'_f} \right]^{\frac{1}{c}} \quad (1)$$

$$\Delta\gamma = C \frac{L_D}{h} \Delta(\alpha\Delta T) \quad (2)$$

$$c = c_0 + c_1 * \overline{T_{SJ}} + c_2 * 10^{-2} \ln \left(1 + \frac{t_0}{t_D} \right) \quad (3)$$

$$L_D = \frac{1}{2} \sqrt{L^2 + W^2} \quad (4)$$

unde ε'_f este coeficientul de ductilitate la oboseală, c este exponentul de ductilitate la oboseală determinat cu (3), $\overline{T_{SJ}}$ este temperatura medie ciclică a îmbinării de lipit, $\overline{T_{SJ}} = 1/4(T_c + T_s + 2T_0)$, T_c , T_s sunt temperaturile în regim staționar pentru componentă (c) și substrat (s), T_0 este temperatura în timpul semiciclului oprit, t_D este timpul de așteptare, C este un factor empiric "neideal", în (4) L_D este distanța de la axa neutră a ansamblului până la cea mai îndepărtată îmbinare de lipit, h este înălțimea îmbinării lipite, α este coeficientul de dilatare termică și ΔT este intervalul de temperatură.

Software-ul Ansys® Sherlock calculează intervalul de deformare la forfecare în funcție de (2) și apoi calculează forța de forfecare asupra îmbinării de lipit folosind ecuația (5) [11]. În cele din urmă, aplicația utilizează modelul de predicție din (6) pentru a determina ciclurile până la defectare, unde W' și m'' iau valorile implicate stabilite de Syed în [12].

$$(\alpha_2 - \alpha_1)\Delta TL_D = F \left(\frac{L_D}{E_1 A_1} + \frac{L_D}{E_2 A_2} + \frac{h_s}{A_s G_s} + \frac{h_c}{A_c G_c} + \left(\frac{2 - \nu}{9 G_b a} \right) \right) \quad (5)$$

$$N_f = (W' w_{cr}^{acc})^{-m''} \quad (6)$$

unde α , ΔT și L_D sunt aceiași parametri ca în (2), E este modulul de elasticitate longitudinală, G este modulul de elasticitate transversală sau modulul de forfecare, A este suprafața, h este înălțimea, iar a este lungimea marginii tamponului de aderență. Indicii 1 reprezintă componenta, 2 și b reprezintă placa de circuit imprimat, s reprezintă îmbinarea prin lipire și c reprezintă tamponul de aderență [13].

Abordarea numerică implică o analiză cu elemente finite (FEA) termomecanică tranzitorie neliniară. Diferite legi de fluaj descriu comportamentul aliajului de lipire. În post-procesare, inginerul introduce răspunsul calculat al îmbinării de lipit într-o ecuație de predicție a duratei de viață pentru a determina ciclurile până la defectare. Modelul de fluaj sinusoidal hiperbolic din (7) și forma sa ca model Garofalo gata de implementare în Ansys Mechanical în (8) este un model adoptat pe scară largă pentru aliajele SAC, așa cum a fost ajustat de Schubert et al. [14]. Tabelul 1 prezintă parametrii modelului și cele patru ecuații de predicție a duratei de viață pentru criteriile de deformare prin fluaj și energie. S-au folosit modelele bazate pe energie denumite modelul Schubert [14] și modelul Syed [12] [15].

$$\frac{d\varepsilon_{cr}}{dt} = A_1 [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(\frac{-Q_1}{RT}\right) \quad (7)$$

$$\frac{d\varepsilon_{cr}}{dt} = C_1 [\sinh(C_2\sigma)]^{C_3} \exp\left(\frac{-C_4}{T}\right) \quad (8)$$

Parametru	$A1$ (s) ⁻¹	α (MPa) ⁻¹	n	$Q1/R$	E (MPa)
	$C1$	$C2$	$C3$	$C4$	$\nu; \alpha$ (ppm/K)
Sn3.8Ag0.7Cu	277984	0.02447	6.41	6500	$E=61251-58.5T$
Sn3.5Ag0.75Cu					$\nu=0,36; \alpha=20$
Sn3.5Ag0.5Cu					
Castin™ [14]					

$$N_f = 345(w_{cr}^{acc})^{(-1.02)} [14]$$

$$N_f = (0.0019w_{cr}^{acc})^{-1} [12]$$

$$N_f = (0.0069w_{cr}^{acc})^{-1} [15]$$

Tabelul 1 Ecuația constitutivă a modelului de fluaj sinusoidal hiperbolic (Garofalo) (7) (8) și valorile parametrilor, precum și modelele de predicție a duratei de viață aferente.

În abordarea raportului densității energiei de deformare (SEDR), defectarea unei îmbinări sudate apare atunci când raportul densității energiei de deformare acumulate depășește o anumită valoare critică. Abordarea SEDR ia în considerare densitatea de energie de deformare acumulată în îmbinarea de lipit din cauza diferitelor condiții de încărcare. Pe baza modelului de

durată de viață Coffin-Manson din (9), SEDR ia forma în (10), unde indicele FailBaseCycle denotă ciclul critic de cedare și densitatea de energie disipată corespunzătoare [11]. SEDR este potrivit pentru SLR, deoarece permite o anumită libertate de modelare în comparație cu modelele de predicție empirice, care necesită reguli stricte de modelare [16].

$$N_f = \Theta_2 (W_{cr}^{acc})^{-c_2} \quad (9)$$

$$N_f = N_{FailBaseCycle} \left(\frac{W_{cr}^{acc}}{W_{cr,FailBaseCycle}^{acc}} \right)^{-c_2} \quad (10)$$

3 Metodologie și rezultate

Pentru a dezvolta o soluție pentru problema identificată, metodologia de cercetare își propune să răspundă la următoarele întrebări de cercetare:

- Cum poate fi utilizată prototiparea virtuală pentru a îmbunătăți fiabilitatea produselor electronice?
- Cum poate fi evaluată starea de tensiune din îmbinările de lipit în contextul sistemului din care fac parte, trecând de la evaluarea fiabilității la nivel de placă la cea la nivel de sistem?
- Poate fi dezvoltat un flux de lucru de simulare pentru evaluarea fiabilității la nivel de sistem?

Ipoteza cercetării este că se poate crea un flux de lucru de simulare pentru evaluarea fiabilității la nivel de sistem prin calibrarea modelelor de simulare la nivelul plăcii. În urma fluxului de lucru dezvoltat, analiza la nivel de sistem poate identifica conexiunile de lipire cu risc de defecțiune și poate sugera îmbunătățiri.

În plus, pentru a dezvolta fluxul de lucru, cercetarea colectează date calitative și combină metodele de cercetare cantitativă și calitativă. Metodele de cercetare calitativă utilizate în acest studiu includ interviuri și discuții cu experți din cadrul organizației Continental (România, Germania, SUA, Singapore și India) și din industrie (NXP, Infineon, Xilinx, Micron, Renesas, AT&S), precum și cu membri ai mediului academic și de cercetare (Institutul Fraunhofer, PCCL, Universitatea Politehnica din București, Universitatea Politehnica din Timișoara), discuții de grup în cadrul Continental, precum și o analiză documentară a literaturii relevante. Grupul de discuție discută provocările și abordările în evaluarea fiabilității îmbinărilor sudate. Analiza documentelor a presupus revizuirea literaturii relevante privind evaluarea fiabilității componentelor electronice. Rețeaua din cadrul companiei implică experți în diverse discipline, cum ar fi FEA, simulare și validare, analiză termică, componente electronice complexe, asamblarea și lansarea de noi produse. Grupurile de discuție includ specialiști și experți în FEA. În cadrul activităților de cercetare, s-a deschis un canal de comunicare cu furnizorii de piese, experți în componente electronice și ingineri de simulare experimentați din partea furnizorilor.

O potențială limitare a cercetării include necesitatea unei experiențe anterioare în domeniu, ceea ce ar putea duce la trecerea cu vederea a unor factori specifici pe care cercetători mai experimentați i-ar fi putut lua în considerare și la formularea unor ipoteze inexacte din cauza lipsei de experiență. Cea mai mare parte a colectării și analizei datelor este eficientă din

punct de vedere al costurilor, fiind cercetare independentă, fără finanțare specifică sau proiect de cercetare.

Reducerea acestui potențial risc a inclus consultarea cu experți în domeniu și participarea la conferințe și cursuri pentru a extinde înțelegerea domeniului de cercetare. Cu toate acestea, selecția metodelor de cercetare calitativă include un alt risc, deviația de selecție. De exemplu, experții și grupul de discuții au fost aleși pe baza disponibilității și a dorinței lor de a participa, ceea ce ar fi putut avea ca rezultat un eșantion nereprezentativ pentru întreaga populație de experți din domeniu. Un alt potențial risc este deviația de confirmare în cadrul metodelor de cercetare cantitativă, în care ideile preconcepute cu privire la performanța componentelor ar fi putut influența analiza. Pentru a atenua aceste riscuri, s-a încercat asigurarea că metodele de cercetare au fost riguroase și obiective și că datele au fost analizate și interpretate cu atenție.

Metodologia implică evaluarea experimentală și teoretică a fiabilității la nivel de placă, simularea la nivel de sistem, precum și standardizarea și punerea în aplicare a fluxului de lucru propus pentru simulare.

În abordarea experimentală, testul a inclus 16 PCB-uri cu câte două din fiecare componentă selectată descrisă în Tabelul 2, montate cu aliaj de lipit SAC305, ca în Figura 2. Componentele au venit cu o topologie de tip “daisy-chain” în scopul testării. Configurația efectuează citiri ale rezistenței electrice a punctului de testare la fiecare 10 secunde. Pragul de eveniment este de 300 Ohmi, ceea ce înseamnă că, dacă rezistența electrică a punctului de testare crește peste acest nivel, acesta va fi considerat o defecțiune. Temperatura variază de la -40°C la +125°C, cu o viteză de 5°C/min. Timpii de așteptare minim și maxim sunt de 15 minute, rezultând un ciclu de 96 de minute, după cum se arată în Figura 3 (stânga). Analiza datelor din rezultatele testului experimental BLR indică o durată de viață caracteristică de 162 de cicluri pentru WLP144, 512 cicluri pentru CVBGA432, respectiv de 786 pentru CTBGA208, după cum se arată în Figura 3 (dreapta). Autorul nu a efectuat experimentele din teză, dar a lucrat timp de trei săptămâni în laboratorul de asigurare a calității de la Continental Temic, Ingolstadt, Germania, pentru a învăța procedurile de testare și de analiză a secțiunilor transversale.

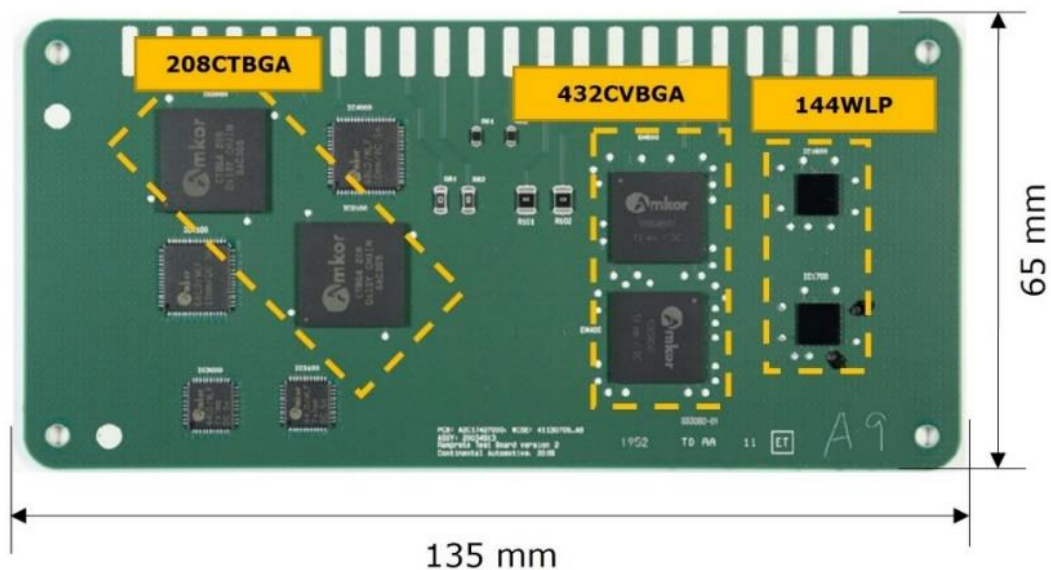


Figura 2 Placa de testare cu componentele marcate incluse în acest studiu. Imagine utilizată prin amabilitatea companiei Continental AG.

Componentă	Substrat	Pastilă siliciu	Încapsulare	Bilă de lipit	Tampon	Pas
	LxWxt	LxWxt	t	Dxh	D _{pkg}	D _{PCB}
WLP144	n/a	5.96x5.96x0.400	n/a	0.256x0.192	0.199	0.247 0.40
CVBGA432	13x13x0.198	9.92x9.92x0.175	0.452	0.254x0.180	0.225	0.200 0.40
CTBGA208	15x15x0.250	12.84x12.84x0.22	0.580	0.419x0.277	0.385	0.331 0.80

Tabelul 2 Atributele componentelor. Toate dimensiunile sunt exprimate în milimetri, mm. L = lungime, W = lățime, t = grosime, h = înălțime, D = diametru.

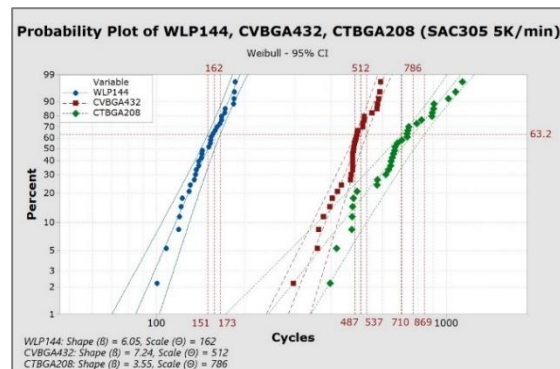
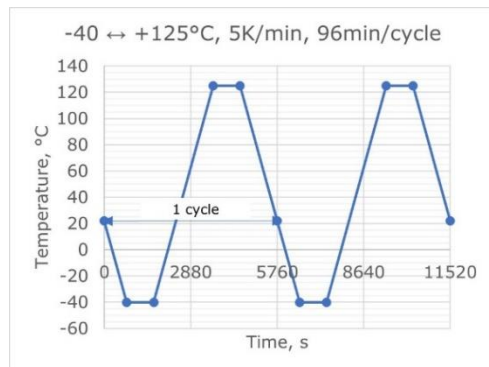


Figura 3 Condiția de testare a ciclurilor termice utilizată în testele BLR (stânga). Graficul de probabilitate Weibull al defecțiunilor WLP144, CVBGA432 și CTBGA208 (dreapta).

Parametru	U.M.	WLP144	CVBGA432	CTBGA208
Parametrii de intrare				
t_D	min	15	15	15
L	mm	5.96	13.00	15.00
W	mm	5.96	13.00	15.00
h	mm	0.19	0.18	0.28
α_C	1/°C	2.60e-6	5.51e-6	7.40e-6
α_S	1/°C	1.52e-5	1.52e-5	1.52e-5
Parametrii calculați				
c (3)	-	-0.452	-0.452	-0.452
L_D (4)	mm	4.21	9.19	10.61
$\Delta\alpha$	1/°C	1.26e-5	9.69e-6	7.80e-6
Parametrii de ieșire				
$\Delta\gamma$ (2)	-	0.0457	0.0817	0.0494
N_f(50%) (1)	cicluri	324	89	272

Tabelul 3 Parametrii de intrare și de ieșire ai modelului Engelmaier [17].

În cadrul abordării teoretice, mai întâi se determină durata de viață la oboseală a pieselor folosind modelul analitic Engelmaier, conform Tabelul 3. De asemenea, s-a folosit aplicația Ansys Sherlock, care determină deformația de forfecare cu o ecuație Engelmaier modificată, ca în Tabelul 4. În continuare, se utilizează FEA pentru a determina criteriile de defecțiune și durata de viață la oboseală a pieselor. Figura 4 prezintă geometria piesei WLP144, cu accent pe îmbinarea prin lipire, iar Figura 5 prezintă discretizarea corespunzătoare. S-a creat un model similar pentru celelalte două piese, apoi s-au asamblat modelele de componente independente în modelul PCB-ului, după cum indică Figura 6. În [18], [19] și [20], s-au prezentat abordările de modelare a PCB-urilor și calibrarea materialelor și direcții generale pentru evaluarea fiabilității. În cele din urmă, la fel ca în figura 7, s-a constrâns PCB-ul Figura 7 pentru a permite dilatarea liberă în timpul ciclurilor termice.

Parametru	Unitatea	WLP144	CVBGA432	CTBGA208
σ	MPa	71.31	60.84	43.12
ΔW	mJ/mm ³	2.831	3.298	1.539
$\Delta \gamma$	-	0.0397	0.0542	0.0357
N_f(63%)	cicluri	186	160	342

Tabelul 4 Rezultatele Ansys Sherlock Solder Fatigue.

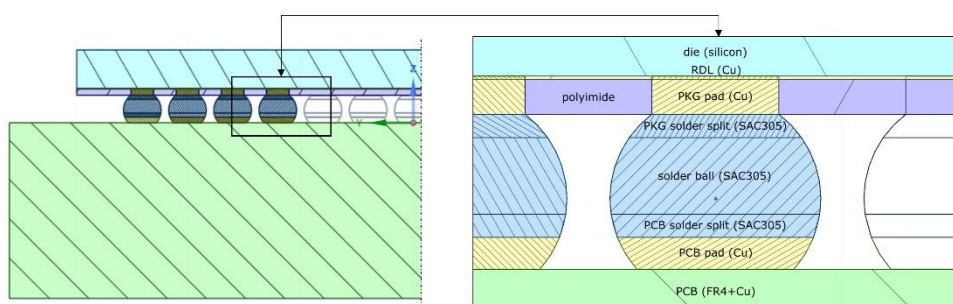


Figura 4 Detaliu al secțiunii transversale WLP144. Imagini utilizate prin amabilitatea ANSYS, Inc.

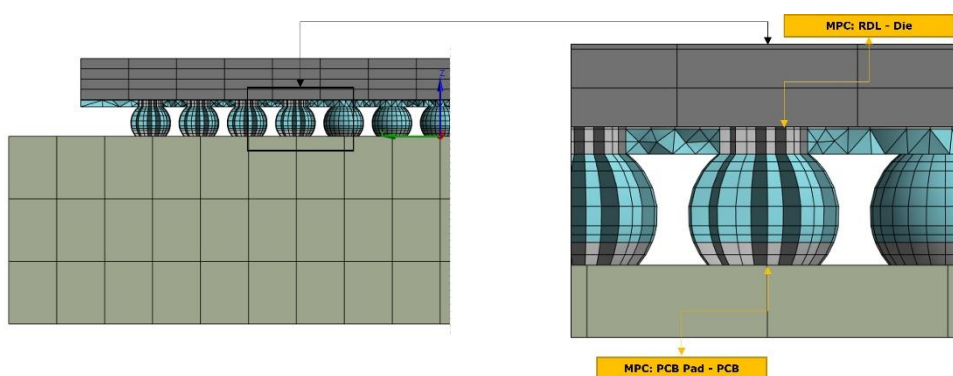


Figura 5 Detaliu al secțiunii transversale a discretizării cu elemente finite WLP144. Imagini utilizate prin amabilitatea ANSYS, Inc.

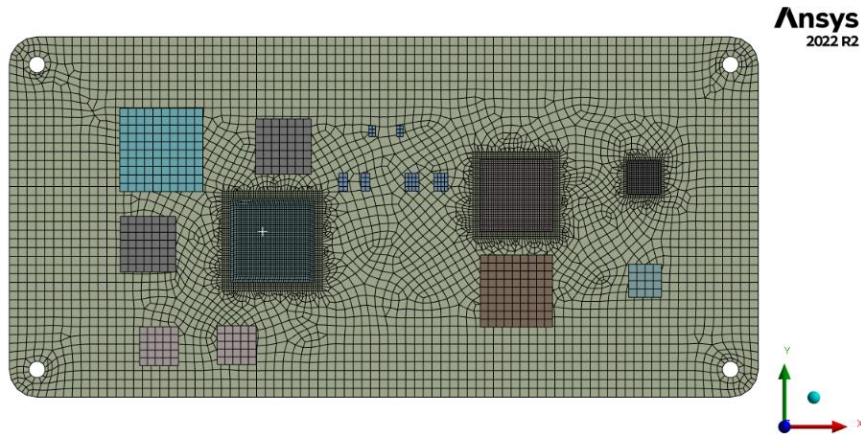


Figura 6 Discretizarea cu elemente finite a ansamblului PCB – componente electronice. Imagine utilizată prin amabilitatea ANSYS, Inc.

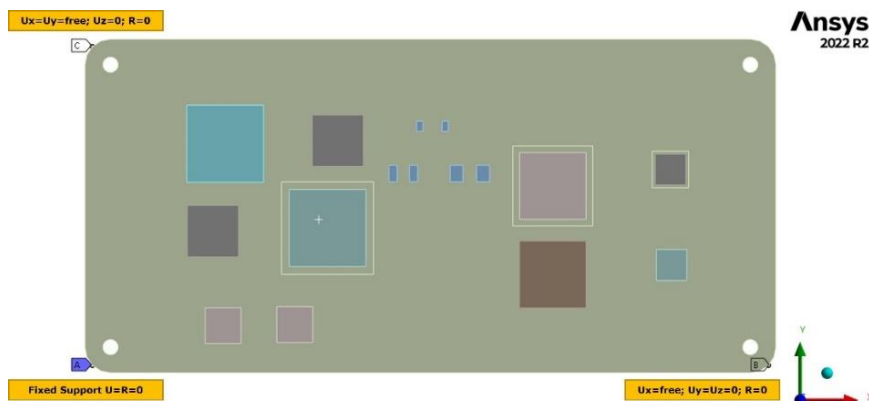


Figura 7 Condiții limită BLR. Imagine utilizată prin amabilitatea ANSYS, Inc.

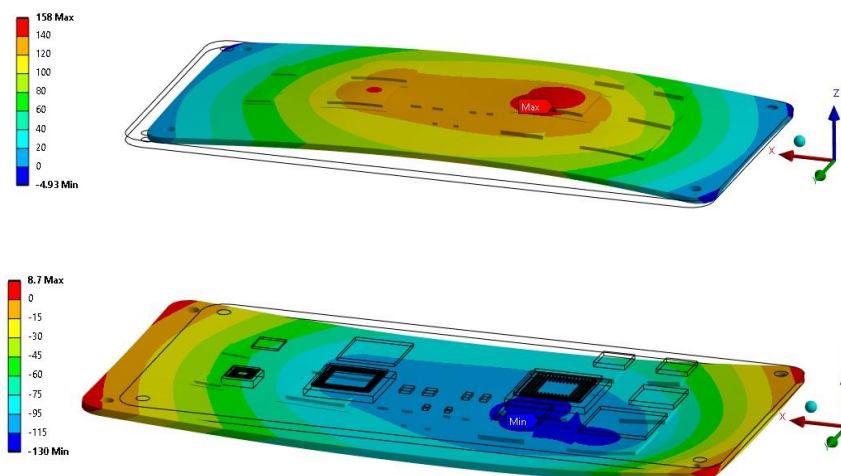


Figura 8 Deformația pe axa Z la -40°C (sus) și 125°C (jos) în analiza la nivel de placă. Unități: μm . Factorul scării de deformație: 35. Imagini utilizate prin amabilitatea ANSYS, Inc

Temperatura negativă produce o deformație maximă de $158\ \mu\text{m}$, iar maxima pozitivă o deformație de $130\ \mu\text{m}$, după cum arată Figura 8. Deformația maximă are loc în poziția componentei CTBGA208. În continuare se evaluează tensiunea echivalentă von Mises în îmbinări și energia provenită din flujaj, acumulată pe durata unui ciclu de temperatură. Tensiunea maximă observată este sub limita de curgere în toate îmbinările. Pentru fiecare

componentă, îmbinarea în care apare tensiunea maximă acumulează și maximul de energie din fluaj. Pentru a evita maximele locale care pot fi rezultatul unei discretizări insuficiente, în continuare se face media pe volum a energiei acumulate din fluaj. Volumul considerat este de 15% din înălțimea lipiturii. Pentru evaluarea riscului de defectare se extrag rezultatele energiei acumulate din fluaj din fiecare lipitură cu ajutorul unui script APDL și se reprezintă într-un grafic cu buline, vezi Figura 9 pentru WLP 144. Pentru valoarea maximă a energiei acumulate din fluaj pe durata unui ciclu de temperatură, se determină durata de viață a componentei considerând modelele de predicție Nf din Tabelul 1. Se determină astfel duratele de viață din Figura 10.

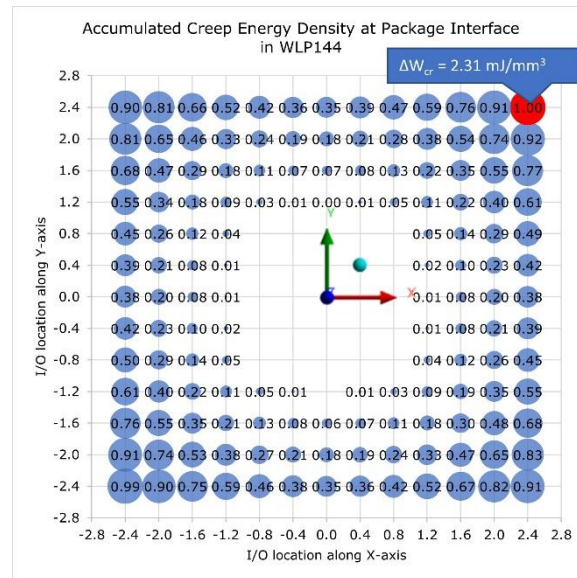


Figura 9 Graficul cu buline pentru WLP144 în analiza la nivel de placă. Bulinele indică valoarea normalizată a deformației acumulate din fluaj în lipituri.

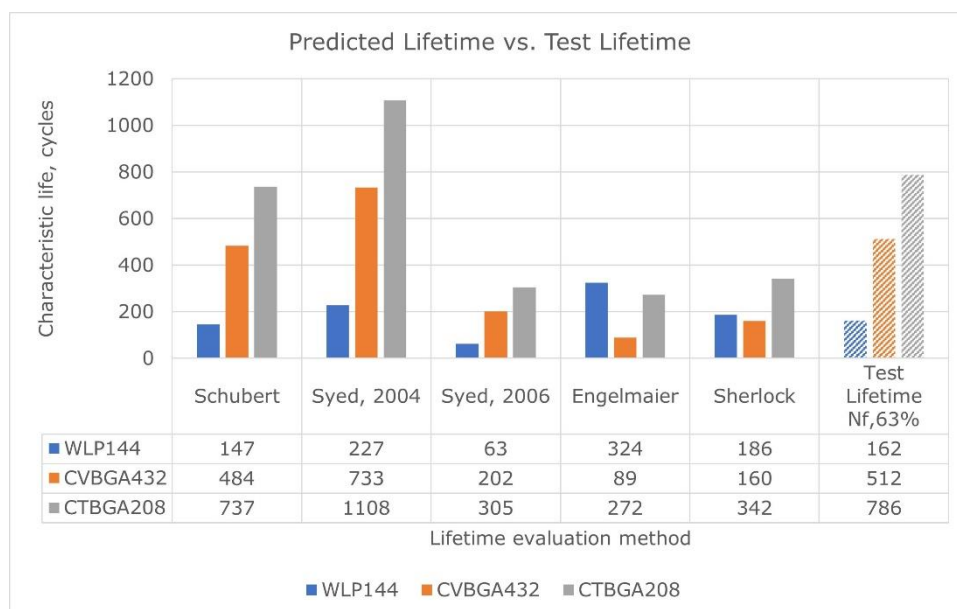


Figura 10 Durata de viață caracteristică a componentelor în analiza la nivel de placă. Comparare între rezultatele obținute prin modelele de predicție bazate pe metoda elementului finit (MEF), analitic și experimental.

Din metodele analitice rezultă suprapredicția duratei de viață a WLP144, dar în cazul celorlalte două componente, metodele analitice rămân conservative. În Figura 11 modelul de predicție Schubert oferă cele mai bune rezultate, cu o eroare maximă de 10%. Modelele Syed redau o eroare mai mare. Din modelul Syed 2004 rezultă o suprapredicție cu 40% a duratei de viață. Modelul a fost ulterior modificat de Syed în 2006, iar modelul nou redă o subpredicție cu o eroare de 60%. În cazul modelelor Syed o deviație crescută este de așteptat deoarece în primul rând Syed a obținut parametrii modelului considerând durata medie de viață, iar comparativ cu durata de viață caracteristică este de așteptat o deviație de 5% pentru un factor $\beta = 10$ al distribuției Weibull. Două alte surse majore de eroare pot proveni din modelul cu elemente finite. Contactele de tip MPC pot introduce constrângeri adiționale, ceea ce duce la creșterea deformației din fluaj, respectiv la subpredicția duratei de viață. O altă sursă de eroare provine din densitatea discretizării cu elemente finite. În mod ideal se dorește îndepărtarea contactelor de zona lipiturii și realizarea unei discretizări foarte fine, aspecte care aduc noi provocări în rezolvarea modelului.

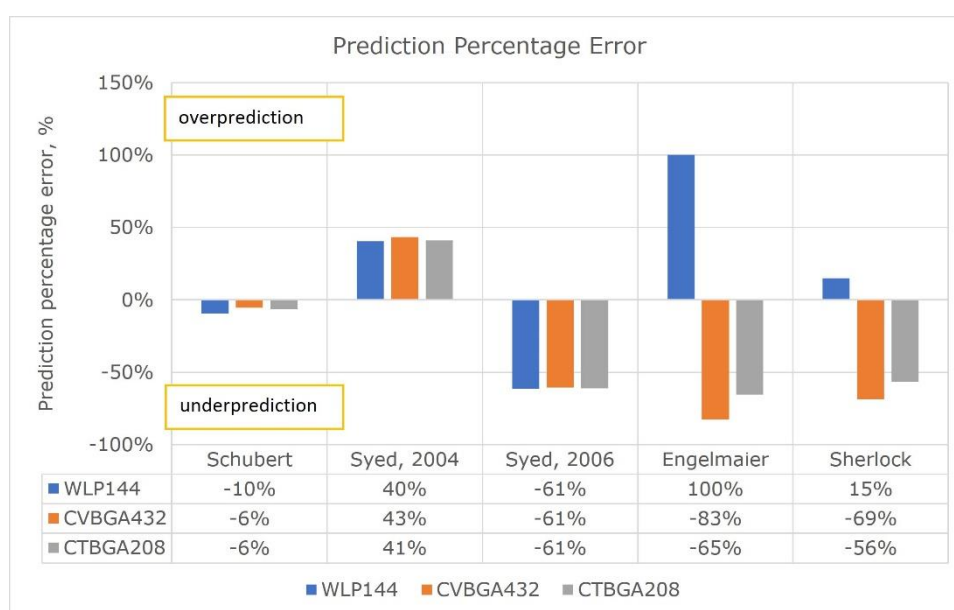


Figura 11 Eroarea predicțiilor față de rezultatele experimentale în analiza la nivel de placă.

Principalul efect pe care îl are integrarea unui sistem este deformarea limitată a PCBA din cauza fixărilor sale. Pentru a simula efectele la nivel de sistem, se consideră încastrate cele patru găuri ale PCBA și se rezolvă din nou modelul fără alte modificări. Rezultatele arată în Figura 12 o deformare maximă 46 μm la -40°C , respectiv 2700 μm la $+125^\circ\text{C}$. Se modifică și locația lipiturii critice pentru toate componentele. Cu toate acestea, WLP144 ar avea o durată de viață prelungită în configurația SLR, în timp ce celelalte două părți ar prezenta defecțiuni mai devreme în SLR decât în BLR, ca în Figura 13, respectiv Figura 14.

După evaluarea fiabilității la nivel de placă, s-a încercat o evaluare a fiabilității pieselor în condiții limită simplificate la nivel de sistem. Urmărind cercetările prezentate în acest capitol și studiile de modelare a PCBA din lucrările publicate, s-a conceput un flux de lucru de simulare pentru evaluarea oboselii cu ciclu redus a PCBA, prezentat în Figura 15.

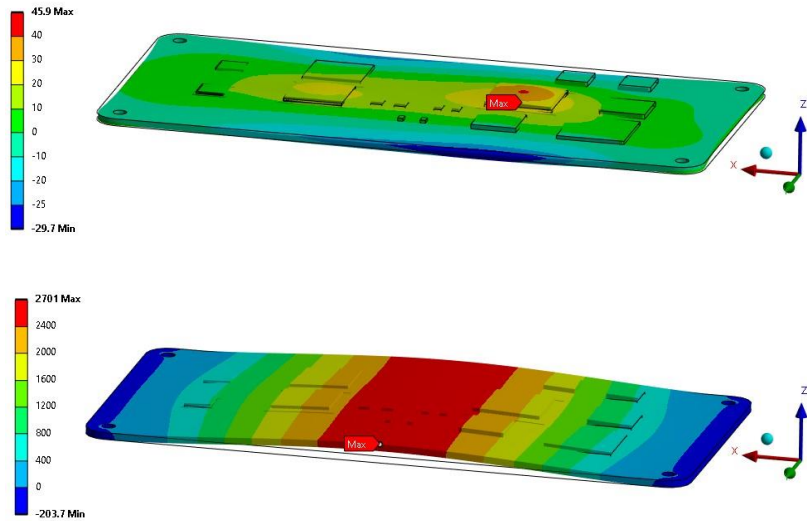


Figura 12 Deformația pe axa Z la -40°C (sus) și 125°C (jos) în analiza la nivel de sistem. Unități: μm . Factorul scării de deformație: 35. Imagini utilizate prin amabilitatea ANSYS, Inc.

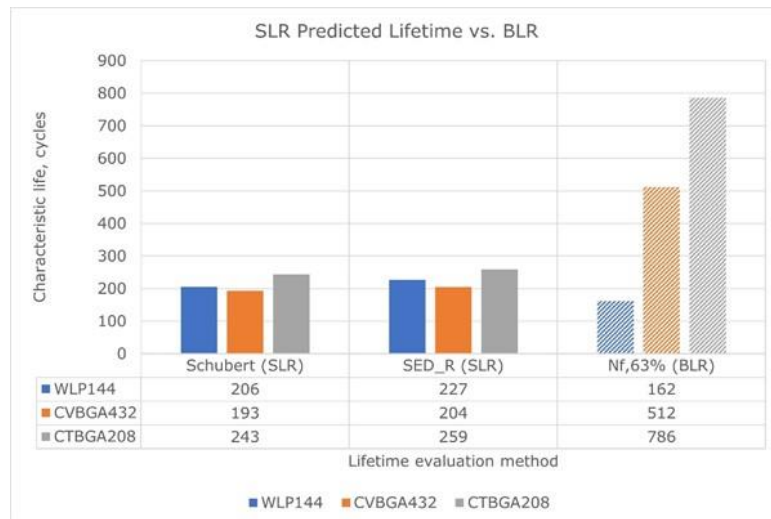


Figura 13 Evaluarea duratei de viață caracteristice SLR vs. BLR prin diferitele metode considerate.

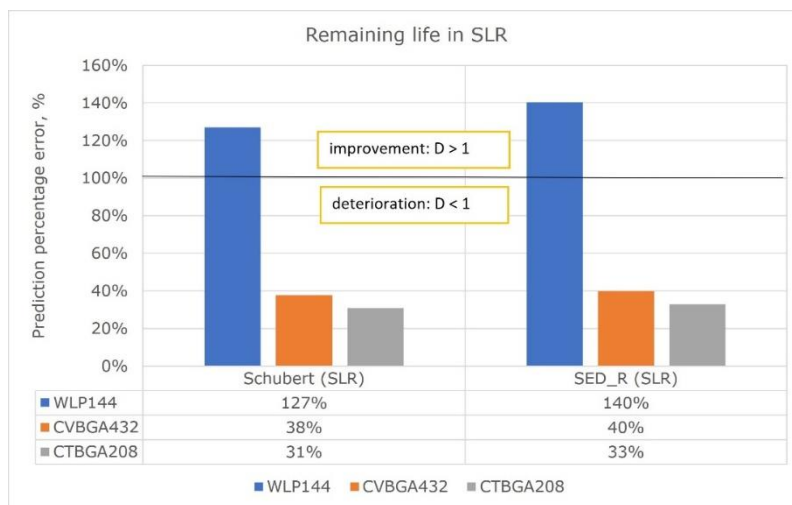


Figura 14 Durata de viață rămasă SLR exprimată în procente.

Prima parte a programului de cercetare (2017-2020) s-a axat pe studiul independent, crearea de rețele, testarea și revizuirea instrumentelor și metodelor, ceea ce a dus la o propunere timpurie a fluxului de lucru discutat. În continuare, implementarea fluxului de lucru propus s-a întins pe parcursul a trei ani, în diferite etape:

- Consolidarea cunoștințelor și a competențelor prin sesiuni de învățare la nivel mondial privind fiabilitatea îmbinărilor sudate (2020) cu 67 de participanți din zece departamente, ore tehnice la nivel corporativ (2021), formare individuală între departamente și sprijin pentru instrumente și metode (2021-2022) și întâlniri periodice ale grupului de utilizatori (2022-2023).
- Coordonarea și conducerea simulărilor de oboseală a lipiturii într-o echipă globală de zece ingineri de analiză structurală, formare individuală și asistență (2020-2023).
- Punerea în aplicare a fluxului de lucru la peste 70 de piese din 17 modele de produse, concentrându-se pe furnizarea de rezultate clare, cum ar fi riscul de a nu trece testul de validare a proiectului și definirea secțiunii transversale (2020-2023).

După implementare, faza de standardizare a avut loc la sfârșitul anului 2022, sub forma unui proces de evaluare a fiabilității predictive, care a inclus formarea în cadrul procesului, tutoriale pas cu pas, supravegherea sarcinilor în curs de desfășurare și o oră tehnică de evaluare a fiabilității predictive pentru publicul nespecializat. S-au putut corela 21 de piese în faza de validare cu rezultatul testului fizic în Figura 16. S-a creat un sistem de clasificare, ca în Tabelul 5, pentru a compara rezultatele simulării cu rezultatele testelor. Analiza oboselii a identificat corect riscul de defecțiune pentru 17 piese, a subestimat riscul pentru două FCBGA, un BGA cu substrat metalic și nu a inclus un BGA.

Criterii de simulare	Criterii de testare	Clasa
Scăzut ($D < 3$ sau $SF > 5$)	fisură minoră $< 25\%$ sau trecere	1
Mediu ($3 \leq D \leq 5$ sau $1 \leq SF \leq 1,5$)	fisură mare 25-95% sau trecere	2
Ridicat ($D > 5$ sau $SF < 1$)	fisură completă $> 95\%$ sau eșec	3

Tabelul 5 Sistemul de clasificare pentru compararea simulării cu testul. D reprezintă daunele relative, iar SF reprezintă factorul de siguranță.

Fluxul de lucru permite o planificare precisă a sarcinilor și definește responsabilitățile în cadrul echipei de dezvoltare. Acest flux de lucru cuprinde trei faze semnificative:

- Faza inițială: Implică comunicarea și alinierea în cadrul echipei de proiect și durează între 1 și 10 zile, în funcție de disponibilitatea contribuțiilor, care se poate extinde pe o perioadă mai lungă.
- Procesul FEA: Durează aproximativ 25 de zile pentru o piesă, cu 5 zile suplimentare pentru fiecare piesă suplimentară. Calibrarea sau măsurătorile suplimentare pot prelungi această perioadă cu 20 de zile dacă lipsesc date.

- Post-procesare: Necesită aproximativ trei zile, din cauza volumului mare de date și a scripturilor APDL ineficiente.

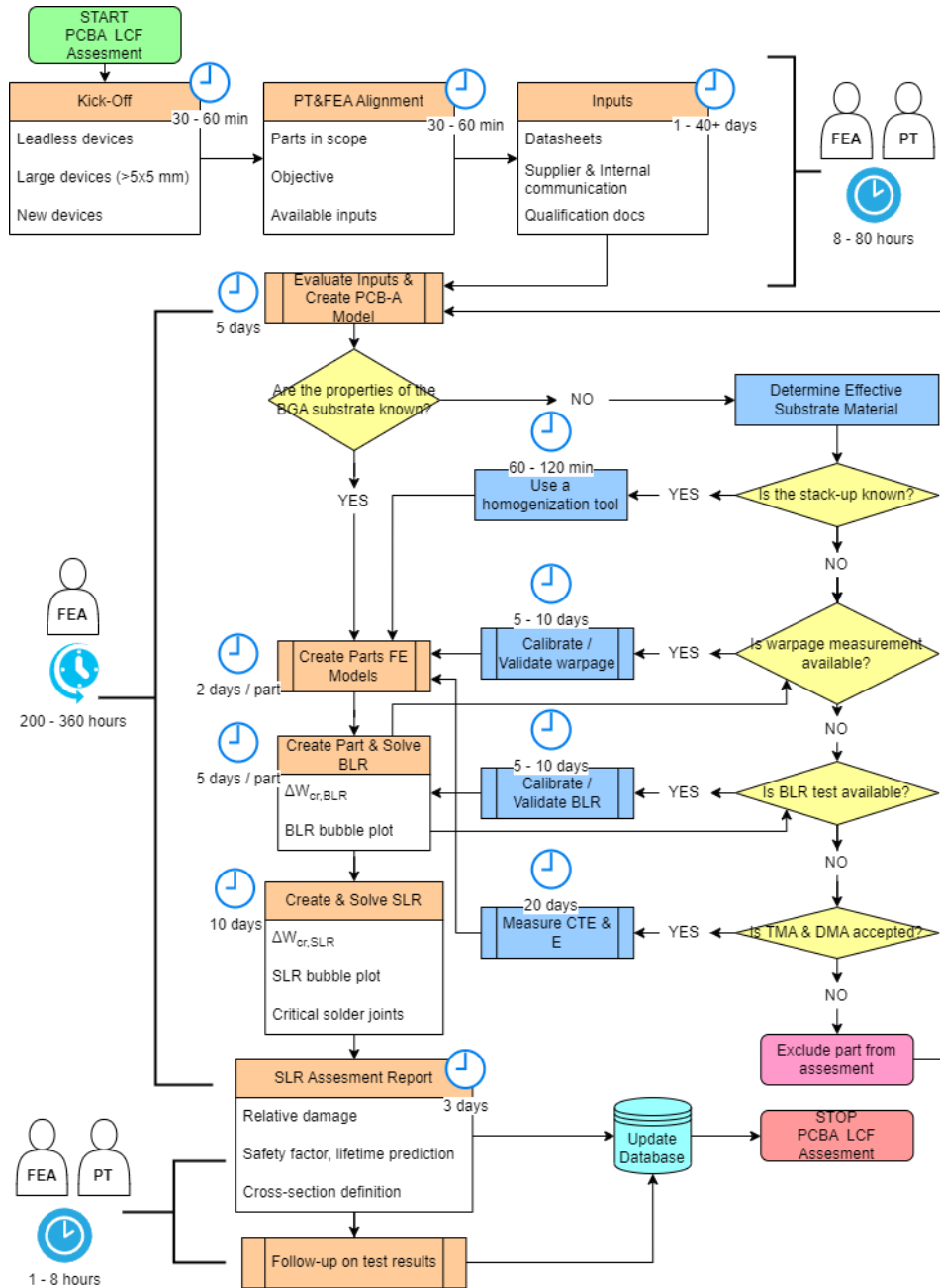


Figura 15 Fluxul de lucru propus pentru evaluarea oboselii cu ciclu redus a PCBA, care prezintă toate etapele și resursele necesare. Imagine utilizată prin amabilitatea companiei Continental AG.

Fluxul de lucru propus pentru evaluarea fiabilității dispozitivelor electronice începe cu o fază de start în care echipa de proiect (PT) identifică componentele care necesită evaluare. Revizuirea literaturii de specialitate a evidențiat sensibilitatea componentelor fără conexiuni aparente (tip BGA, QFN) și a dispozitivelor de mari dimensiuni la oboseala cu ciclu redus. Un inginer FEA colaborează apoi cu PT pentru a defini domeniul de aplicare, obiectivele analizei și datele de intrare disponibile.

Provocarea principală a fluxului de lucru este colectarea datelor de intrare necesare. Pentru a modela eficient piesele, inginerii care integrează componentele au nevoie de acces la

informații complete. Acest lucru necesită colaborarea între diverse discipline, cum ar fi inginerii de hardware, inginerii de componente, managerii de calitate ai furnizorilor și inginerii de materiale. Efortul lor colectiv are ca scop colectarea a cât mai multor date.

Inginerul FEA evaluează apoi datele de intrare, abordând datele lipsă sau eronate. Documentele de calificare, fișele tehnice și comunicarea directă cu furnizorii oferă informațiile necesare.

Odată ce toate datele necesare au fost obținute, inginerul FEA construiește modelul cu elemente finite BLR al pieselor, de obicei ca o singură piesă pe un mic PCB, pentru a simula testele standard de fiabilitate. Validarea este crucială, în special atunci când sunt accesibile date experimentale precum analiza deformării sau rezultatele testelor de fiabilitate la nivel de placă.

În urma analizei BLR, piesele sunt integrate în PCBA, creând un decupaj în PCB-ul mare și introducând modelul BLR. Raportul trebuie să cuprindă evaluări relative ale defectării între BLR și SLR și definiții ale secțiunilor transversale pentru toate componentele considerate. În cazurile în care sunt disponibile rezultatele testelor BLR, se utilizează abordarea SED-R pentru a prezice durata de viață preconizată a SLR și factorii de siguranță în raport cu cerințele de testare.

Inginerii FEA se întorc la echipa de proiect cu raportul și monitorizează rezultatele viitoarelor teste de calificare. Sarcina este considerată finalizată odată ce baza de date internă este actualizată.

Pe scurt, acest flux de lucru propus implică colectarea meticuloasă a datelor, analiza cu elemente finite și integrarea în PCBA pentru a evalua fiabilitatea dispozitivului electronic, cu considerații privind calibrarea și validarea. Durata procesului variază în funcție de disponibilitatea și complexitatea datelor, cu un timp considerabil dedicat sarcinilor de postprocesare.

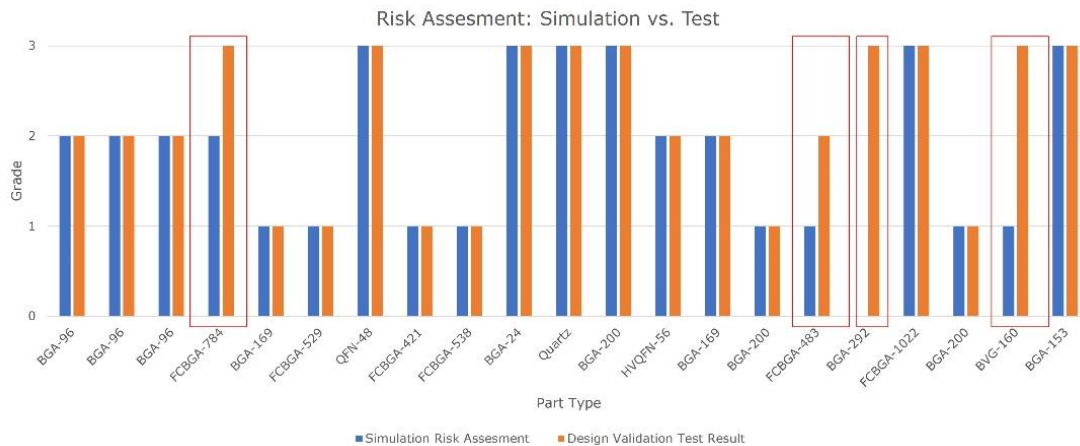


Figura 16 Validarea fluxului de lucru propus: simularea vs. evaluarea riscului de testare. Imagine utilizată prin amabilitatea companiei Continental AG.

4 Discuție

Rezultatele cercetării indică faptul că analiza la nivel de placă, fie ea analitică sau numerică, poate arăta relația dintre anumiți parametri, cum ar fi proprietățile mecanice și deformarea de forfecare, respectiv energia acumulată din fluaj în lipitură. În evaluarea stării de tensiune în îmbinările de lipit la nivel de sistem, rezultatele cercetării sugerează că cea mai

potrivită abordare este integrarea directă a unui model detaliat de fiabilitate la nivel de placă (BLR) în ansamblul plăcii de circuite imprimate (PCBA) în cadrul modelului de sistem. Această metodă asigură consecvența în timp și la diferiți utilizatori, după cum a demonstrat evaluarea fiabilității la nivel de sistem realizată în studiul efectuat. Concentrarea asupra rezultatului dorit este esențială atunci când se aleg simplificările adecvate pentru evaluarea fiabilității la nivel de sistem. Cercetarea a culminat cu dezvoltarea unui flux de lucru de simulare pentru evaluarea fiabilității la nivel de sistem, care reprezintă baza unui proces de simulare la nivelul întregii companii. Deși validarea statistică a rezultatelor nu a făcut parte din programul de cercetare, s-a efectuat validarea prin aplicarea metodelor discutate în această teză la peste 70 de piese din 17 modele de produse diferite. Rezultatele au demonstrat un rezultat favorabil în ceea ce privește evaluarea riscurilor în comparație cu rezultatele testelor.

5 Concluzie

Cercetarea a abordat o problemă practică din industria de producție a pieselor auto, oferind orientări practice pentru evaluarea predictivă a fiabilității. Constatările au aplicații în lumea reală în selectarea materialelor și componentelor, optimizarea proiectelor mecanice, implementarea redundanței, definirea analizei secțiunii transversale și propunerea de măsuri de îmbunătățire a fiabilității. Aceste orientări servesc drept instrumente valoroase pentru producătorii de automobile pentru a spori fiabilitatea produselor lor, asigurând o performanță mai bună și reducând riscul de defecțiuni în cazul componentelor critice.

Perspectivile de cercetare se concentrează pe câteva domenii critice pentru explorare și dezvoltare ulterioară. Printre acestea se numără automatizarea proceselor și crearea unei baze de date cuprinzătoare pentru materiale și componente. Domeniile potențiale de interes sunt simularea circuitelor integrate foarte mari și utilizarea designului de experimente (DoE) pentru a determina efectele la nivel de sistem.

Principalele contribuții ale analizei bibliografice efectuate pentru teza de doctorat și contribuțiile lucrărilor publicate sunt:

- Sinteza modelelor de materiale de lipit și modelele corespunzătoare de predicție a duratei de viață bazate pe FEA în teză, [11] și [16].
- Sinteza modelelor analitice de predicție a duratei de viață în [17].
- Sinteza datelor experimentale BLR și caracterizarea pieselor aferente în [17].
- Sinteza modelelor de materiale PCB în [18], [19], și [20].

Lucrările de cercetare [18], [19], și [20] au explorat diverse aspecte ale modelării PCB și au analizat impactul unor factori precum proprietățile mecanice, geometriile și alegerile de materiale asupra fiabilității PCB. În general, contribuțiile de cercetare legate de modelarea PCB includ o evaluare a posibilităților de modelare a PCB, un flux de testare pentru evaluarea eficienței din punct de vedere al costurilor a răspunsului PCB și o procedură de calibrare a materialelor PCB. Cercetarea reprezintă piatra de temelie pentru eforturile ulterioare în curs de desfășurare în vederea dezvoltării unui flux de lucru pentru modelarea PCB și a componentelor pentru analiza deformării.

În [11] și [16], cercetarea s-a concentrat pe modelarea la nivel de sistem prin integrarea modelelor detaliate la nivel de placă în modelul de sistem pentru a analiza fiabilitatea întregului sistem electronic. Contribuția la modelarea la nivel de sistem este evaluarea evaluării fiabilității la nivel de sistem în cadrul diferitelor metodologii. Acestea arată că diferitele abordări conduc

la rezultate diferite și subliniază necesitatea disponibilității datelor experimentale BLR pentru predicții fiabile ale duratei de viață SLR. De asemenea, au arătat aplicabilitatea abordării SED-R și a lui Sherlock ca preprocesor.

Teza și [17] combină date experimentale, calcule analitice și simulări numerice. Teza contribuie cu o analiză detaliată a BLR cu ajutorul FEA folosind trei modele de predicție bazate pe FEA și două abordări analitice. Capitolul 3.2.1 și articolul de jurnal și [17] includ date experimentale BLR, geometrie și parametri de material pentru studii ulterioare. Pe lângă datele experimentale din teză, articolul colectează date din literatura de specialitate. Articolul se concentrează pe metodele analitice și discută complexitățile și parametrii luați în considerare.

Teza a propus o abordare la nivel de sistem pentru evaluarea fiabilității și a dezvoltat un flux de lucru cuprinzător. Aceasta a introdus instrumente și metode de eficientizare a procesului de analiză, asigurând coerența și eficiența evaluărilor de fiabilitate. Aceste contribuții au oferit un cadru structurat pentru efectuarea evaluărilor de fiabilitate la nivel de sistem.

Cercetările din teza de doctorat și din articolele [11] și [16] au demonstrat impactul efectelor la nivel de sistem asupra fiabilității pieselor. Având în vedere interacțiunile și dependențele dintre componente, cercetarea arată că factorii la nivel de sistem pot reduce semnificativ fiabilitatea pieselor individuale. Această constatare a subliniat importanța analizei la nivel de sistem pentru îmbunătățirea fiabilității globale.

Cercetarea a avut ca scop dezvoltarea competențelor prin coaching, diseminare, grupuri de lucru și implementare la nivelul întregii companii. Prin crearea unei conștientizări și facilitarea schimbului de cunoștințe, cercetarea a contribuit la dezvoltarea expertizei în domeniul evaluării fiabilității. În sprijinul fluxului de lucru propus, autorul a creat tutoriale nepublicate, de tip pas cu pas pentru fiecare fază, de la colectarea datelor până la postprocesarea rezultatelor.

Cercetarea a dezvoltat de asemenea un proces de simulare și scripturi de automatizare pentru a simplifica evaluările de fiabilitate. Aceste contribuții au îmbunătățit eficiența procesului de analiză, reducând efortul manual și crescând productivitatea. De asemenea, au fost elaborate materiale de instruire și o bază de date cu piese și materiale, care au sprijinit și mai mult procesul de simulare.

6 Referințe

- [1] D. S. Steinberg, *Vibration analysis for electronic equipment*, New York: John Wiley and Sons Inc., 2000.
- [2] B. Sood, „Root-Cause Failure Analysis of Electronics,” 14 03 2013. [Interactiv]. Available: <https://bit.ly/bhanusood>. [Accesat 24 02 2023].
- [3] A. Aragon, U. Huber, T. Moeller și H. Nick, „Return to sender: Resolving the automotive-recall resurgence,” McKinsey & Company, 13 February 2019. [Interactiv]. Available: <https://bit.ly/adrianaaragon>. [Accesat 07 02 2013].
- [4] S. Cho, B. Han și J. Joo, „Temperature Dependent Deformation Analysis of Ceramic Ball Grid Array Package Assembly Under Accelerated Thermal Cycling Condition,” *ASME Journal of Electronic Packaging*, vol. 126, nr. 1, pp. 41-47, 2004.
- [5] *IPC-9701B Thermal Cycling Test Method for Fatigue Life Characterization of Surface Mount Attachments*, Bannockburn: IPC, 2022.
- [6] F. Schempp, M. Dressler, D. Kraetschmer, F. Loerke și J. Wilde, „Introduction of a New Metric for the Solder Joint Reliability Assessment of BGA Packages on System Level,” în *IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference*, San Diego, 2018.
- [7] F. Schempp, M. Dressler, D. Kraetschmer, F. Loerke și J. Wilde, „Experimental Investigation of the Correlation between a Load-Based Metric and Solder Joint Reliability of BGA Assemblies on System Level,” în *69th Electronic Components and Technology Conference*, Las Vegas, 2019.

- [8] R. Dudek, „Characterization and Modelling of Solder Joint Reliability,” in *Mechanics of Microelectronics*, Dordrecht, Springer, 2006, pp. 377-418.
- [9] J. H. Lau, „State of the Art of Lead-Free Solder Joint Reliability,” *Journal of Electronic Packaging*, vol. 143, nr. 2, 2021.
- [10] W. Engelmaier, „Solder Attachment Reliability, Accelerated Testing, and Result Evaluation,” in *Solder Joint Reliability*, Boston, Springer, 1991, pp. 545-587.
- [11] I. E. Ținca, D. Faller și P. Rai, „System-Level Flip-Chip Ball Grid Array Solder Joint Reliability Assessment Under Different Methodologies and Correlation with Accelerated Thermal Cycling Experimental Data,” in *Electronics System-Integration Technology Conferences*, Vestfold, 2020.
- [12] A. Syed, „Accumulated creep strain and energy density based thermal fatigue life prediction models for SnAgCu solder joints,” in *54th Electronic Components and Technology Conference*, Las Vegas, 2004.
- [13] R. Schueller și C. Tulkoff, „Design for reliability with: Computer modeling,” *Printed Circuit Design and Fab/Circuits Assembly*, vol. 31, pp. 26-42, 2014.
- [14] A. Schubert, R. Dudek, E. Auerswald, A. Gollhardt, B. Michel și H. Reichl, „Fatigue life models for SnAgCu and SnPb solder joints evaluated by experiments and simulation,” in *53rd Electronic Components and Technology Conference, 2003. Proceedings.*, New Orleans, 2003.
- [15] A. Syed, „Updated Life Prediction Models for Solder Joints with Removal of Modeling Assumptions and Effect of Constitutive Equations,” in *7th. Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, EuroSimE*, Como, 2006.
- [16] I. E. Ținca, „Optimized FE Model for System-Level Solder Joint Reliability Analysis of a Flip-Chip Ball Grid Array Package,” in *New Advances in Mechanisms, Mechanical Transmissions and Robotics*, Timișoara, 2021.
- [17] I. E. Ținca și A. Davidescu, „Analytical Fatigue Life Prediction of Ball Grid Array Solder Joints,” *Journal of Electronic Materials*, nr. in press, 2023.
- [18] I. I. Ailinei, I. E. Ținca, A. M. Silaghi, C. Bleoju, A. Davidescu și L. Marșavina, „Evaluation of Finite Element Modelling Techniques of Printed Circuit Boards under Dynamic and Static Loading and Validation with Experimental Data,” in *2021 IEEE 27th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Timișoara, 2021.
- [19] I. E. Ținca, I. I. Ailinei și A. Davidescu, „Printed Circuit Board Orthotropic Material Calibration for Static and Dynamic Loading,” in *Electronics System-Integration Technology Conference*, Sibiu, 2022.
- [20] I. E. Ținca, I. I. Ailinei și A. Davidescu, „Printed Circuit Board Assembly Modeling for Predictive Reliability Assessment,” in *2022 IEEE 28th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging, SIITME 2022*, Bucharest, 2022.