

Forraszkötések termomechanikai degradációjának vizsgálata 3D röntgenmikroszkópiával és végelelemes szimulációval

Investigation of the thermomechanical degradation of solder joints using
3D X-ray microscopy and finite element simulation

Varga Dorottya^{a,c}, Szabó Péter János^b

^aBudapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, PhD hallgató, varga.dorottya@edu.bme.hu

^bBudapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Egyetemi tanár, szabo.peter.janos@gpk.bme.hu

^cRobert Bosch Kft., Mérnök, dorottya.varga@hu.bosch.com

Kulcsszavak

forraszkötés,
röntgenmikroszkóp,
megbízhatóság,
végelelemes szimuláció,
roncsolásmentes anyagvizsgálat

Absztrakt

A forraszkötések termomechanikai megbízhatóságának vizsgálatához 0805 méretű, Innolot forrasztanyaggal szerelt ellenállásokat hőciklusoknak tettünk ki. A degradáció nyomon követésére röntgenmikroszkópos felvételeket készítettünk, amelyek alapján a repedéshosszak és egy új térfogati mérőszámot, a forraszkötés és a teljes térfogat arányát határoztuk meg. Az eredmények szerint a termikus ciklusok előrehaladtával a repedések növekedtek, míg a térfogati arány egy közel 500 ciklusos inkubációs szakasz után lineárisan csökkent. A röntgenfelvételekből létrehozott valós geometriájú végelelemes modell eredményei igazolják, hogy a röntgenmikroszkópos adatokon alapuló valós geometria alkalmazása a forraszkötések mechanikai viselkedésének pontosabb modellezését teszi lehetővé, és megfelelő alapot biztosíthat az élettartam-becsléshez.

Keywords

solder joint,
X-ray microscopy,
reliability,
finite element simulation,
non-destructive testing

Abstract

To investigate the thermomechanical reliability of solder joints, 0805 size resistors assembled with Innolot solder were subjected to thermal cycling. To monitor the degradation, X-ray microscopy images were taken, based on which crack lengths and a new volumetric metric, the solder/total volume ratio, were determined. According to the results, the cracks grew continuously, while the volume ratio decreased linearly after an incubation period of nearly 500 cycles. The results of the finite element model based on the real geometry reconstructed from X-ray images demonstrate that using the actual geometry derived from X-ray microscopy data enables a more accurate modeling of the mechanical behavior of solder joints and can provide a suitable basis for lifetime estimation.

1. Bevezetés

A forraszkötések kritikus szerepet játszanak az elektronikai eszközök megbízhatóságában, mivel ezek biztosítják a mechanikai és elektromos kapcsolatot az alkatrészek és a nyomtatott áramköri lap (NYÁK) között [1, 2]. A forraszkötések [3] tönkremenetelének megértése kiemelt feladattá vált, mivel tönkremenetelük akár végzetes kimenetelű bal- esetet is okozhat. A forraszkötéseket érintő egyik kritikus tönkremeneteli mechanizmus a kisciklusú fáradás [4], amit a ciklikus terhelés vált ki, mivel a nyomtatott áramköri lap és a ráforrasztott alkatrész hőtágulási együtthatója eltérő. Az elmúlt két évtizedben a kutatók számos új módszert fejlesztettek repedések vizualizációjára és vizsgálatára [3, 5, 6], azonban számos esetben a módszer nem ad 3D információt a repedés morfológiájáról. A repedésterjedés vizsgálatára szolgáló hagyományos módszerek gyakran roncsolásos vizsgálatokat igényelnek, ami korlátozza a repedések előrehaladásának megfigyelését ugyanazon a mintán. Ezzel szemben a röntgenmikroszkópia (X-ray microscopy, XRM) egy hatékony, roncsolásmentes képalkotási technikát kínál, amely lehetővé teszi a forraszkötések belső szerkezetének és hibáinak nagy felbontású megjelenítését [7].

Számos cikkben [8-11] vizsgálnak forraszkötéseket röntgen-számítógépes tomográfia (computed tomography, CT) segítségével. Chang és munkatársai [12] röntgentomográfiai felvételekkel vizsgálták a kötésekben lévő üregek viselkedését elektromigráció során. Az elektromigrációs vizsgálat kezdeti szakaszában elkülönült üregek keletkeztek és jelentősen megnöttek. A vizsgálati fázis későbbi szakaszában ezek az üregek összeolvadtak nagyobb üregek, ami jelentősen befolyásolta a forrasztási kötések

mechanikai tulajdonságait. Hasonlóképpen, Kelly és munkatársai [13] röntgen-mikrotomográfiát (μ CT) alkalmaztak az intermetallikus vegyületek (intermetallic compounds, IMC-k) és az üregek kialakulásának vizsgálatára az elektromigráció során. Eredményeik szerint az IMC-k a nagy szögű szemcsehatárok és ikerhatárok mentén növekedtek. Ezen felül az üregek disszociáltak a katód felületén, ami az egyes üregek térfogatának csökkenéséhez vezetett, miközben az üregek teljes száma gyorsan nőtt. Ezek a tanulmányok értékes betekintést nyújtanak a forrasztási kötések belső szerkezetébe, és igazolják, hogy az üregek eloszlása elemezhető és vizualizálható. Az említett tanulmányok azonban nem foglalkoznak azzal, hogy ezek az üregek hogyan viselkednek egy valódi forrasztási kötésben hőciklusok során.

Mivel a röntgentomográfia roncsolásmentes módszer [14, 15], hatékony eszköz lehet a repedésterjedés követésére is. Az irodalom áttekintése alapján a 3D-s képalkotó technológiákat alkalmazó, forrasztási kötések repedésterjedését vizsgáló kutatások száma korlátozott. A fejlett képalkotási technikák alkalmazásával célunk a repedések viselkedésének és az elektronikai eszközök megbízhatóságára gyakorolt hatásuknak a vizsgálata. A terület fejlődésével a repedésterjedés mechanizmusainak folyamatos kutatása elengedhetetlen lesz a megbízhatóbb elektronikai eszközök fejlesztéséhez.

A röntgenmikroszkópia alkalmazása azonban nem csupán a belső károsodások roncsolásmentes megfigyelését teszi lehetővé, hanem egyre nagyobb jelentőséggel bír a valós geometrián alapuló numerikus modellezésben is [16]. Az XRM-felvételekből rekonstruált háromdimenziós térfogati modellek [17] közvetlenül felhasználhatók végelelemes modellek létrehozására, amelyek a

hagyományos, számítógéppel támogatott tervezéssel (computer-aided design, CAD) létrehozott idealizált geometriákkal szemben a forraszkötések tényleges alakját, a gyártásból származó geometriai eltéréseket, az üregek eloszlását [18], valamint a már kialakult repedéseket is figyelembe veszik [19].

A jelen kutatás célja a forraszkötések termomechanikai terhelésből eredő tönkremenetelének roncsolásmentes követése. A röntgenmikroszkóp lehetővé teszi, hogy végig követhessük a belső tönkremenetelt, illetve reális kiindulási geometriát biztosít végeselemes szimulációkhoz.

2. Vizsgált anyagok és módszerek

A vizsgálatokhoz 0805-ös felületszerelt chipellenállásokat választottunk, mivel ezek széles körben alkalmazott elektronikai alkatrészek. Három ellenállást (K1, K2 és K3 azonosítóval) Innolot [20] forraszpasztával forrasztottunk fel a nyomtatott áramkört lapokra. A minták ezután hőciklusos terhelést kaptak, -40°C és 125°C között az IPC-9701B [21] szabványnak megfelelően. A fűtési és hűtési sebesség $10^{\circ}\text{C}/\text{perc}$, a hőtartási idő 15 perc volt; a vizsgálat összesen 2000 ciklusból állt.

2.1 Röntgenmikroszkópos vizsgálat

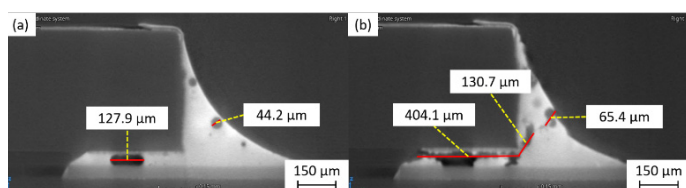
A forraszkötések öregítése előtt egy kiindulási felvétel készült, majd 500, 1000, 1500 és 2000 ciklus után készült felvétel.

A vizsgálatokat egy Zeiss Xradia Versa 620-as röntgenmikroszkóp segítségével végeztük el, a felvételek készítése során pedig 160 V-os gyorsító feszültséget és 25 W-os teljesítményt állítottunk be. A mintákat a mintatartóra rögzítettük, mivel a 3D-s felvételek elkészítéséhez 360° -os körbeforgatásra volt szükség. A képminőség javítása érdekében He1-szűrőt helyeztünk a röntgensugárforrás és a minta közé, és 4×-es objektívet alkalmaztunk. Egy felvétel elkészítése 3 órát és 20 percet vett igénybe, a végső voxelméret pedig $1,9\text{ }\mu\text{m}$ lett.

A felvételek feldolgozása VGStudio Max 2023.3 szoftver segítségével történt. A szoftver a forrasz térfogatát szürkeárnyalati értékek alapján szegmentálta, majd STL-fájlformátumban exportálta.

2.2 Kiértékeléshez használt mérőszámok

A 3D röntgenmikroszkópos felvételekből számos kiértékelési mérőszám határozható meg, legyen szó kétdimenziós mérőszámokról, például repedéshosszról, vagy háromdimenziós térfogati mérőszámokról.



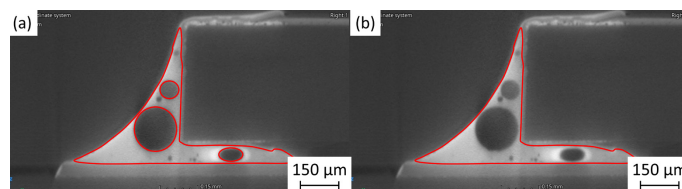
1. ábra: Repedéshosszak meghatározása
a) kiindulási állapotban és b) 1500 ciklus után

2.2.1 Folytonossági hibák összesített hossza

Az egyik legfontosabb kiértékelési paraméter a forraszkötésen belüli folytonossági hibák összesített hossza volt, amely magában foglalta a repedéseket és az üregeket is. A repedéshosszak három különböző, egymással párhuzamos síkon is megállapításra kerültek, mivel a 3D-s felvételek lehetővé tették azt, hogy mindig ugyanazt a síkot vizsgáljuk a repedésterjedés során. A forraszkötés két oldalát külön-külön értékeltük ki, a repedéshosszak mérése pedig az 1. ábrán látható módon történt.

2.2.2 Forraszkötés és teljes térfogat aránya

A repedéshossz sok esetben hasznos mérőszám, azonban kétdimenziós információra korlátozódik. A kiválasztott sík sokszor véletlenszerű és nem feltétlenül reprezentálja a teljes kötés állapotát. Ennek a problémának a kiküszöbölésére vezettük be a forraszkötés és teljes térfogat arányát. Szürkeárnyalatos szegmentációt használtunk a forraszkötés térfogatának meghatározásához, míg a teljes térfogat meghatározásakor az üregeket és a repedéseket is figyelembe vettük (2. ábra).



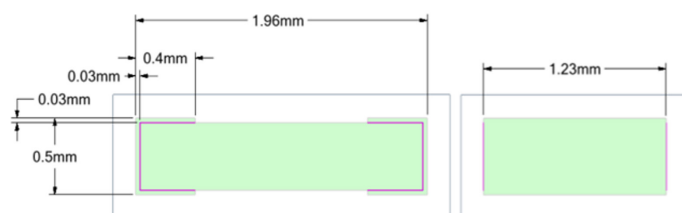
2. ábra: a) Szegmentált forrasztérfogat és b) a teljes térfogat

2.2.3 Komponens elemelkedés

A termikus öregedés során, a forraszanyag degradációjával párhuzamosan, a komponens NYÁK-hoz viszonyított magassága folyamatosan változik. Ezt a változást mértük, mivel ez az érték ugyanúgy megkapható a végeselemes szimulációkból is, így alkalmas lehet a különböző modellek validálására. Mivel a szimulációk során csak egy mintát használtunk fel, ezért a kiértékelés során itt is csak a K1 minta adatait értékeltük ki.

2.3 Végeselemes szimulációk

A végeselemes szimulációk alapjául a K1 minta felvételeit használtuk fel. A szegmentálás után kimentett STL fájlokat beolvastuk az Ansys SpaceClaim szerkesztő programjába, ahol a geometrián különböző javításokat végeztünk: detektáltuk, majd javítottuk az önmetsző felületeket, a hibás éleket és a hibás felületeket. A komponens modellje az adatlapja, valamint a röntgenképen mérhető dimenziók alapján lett felépítve (1. táblázat és 3. ábra).



3. ábra: Komponens méretei

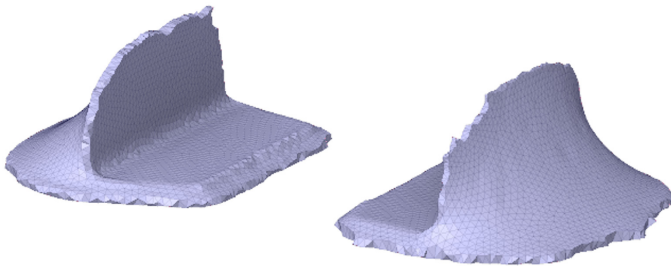
1. táblázat: Komponens névleges méretei

Hosszúság (mm)	Szélesség (mm)	Magasság (mm)	Ónozás szélessége (mm)	Ónozás magassága (mm)
2,0 ± 0,1	1,25 ± 0,1	0,55 ± 0,1	0,3 ± 0,2	0,3 ± 0,2

A forraszanyag, a komponens és a NYÁK csatlakozó-felületének (pad) pontos illesztése érdekében geometriai műveleteket – többek között extrudálást és felületegyesítést – hajtottunk végre az érintkezési zónákban.

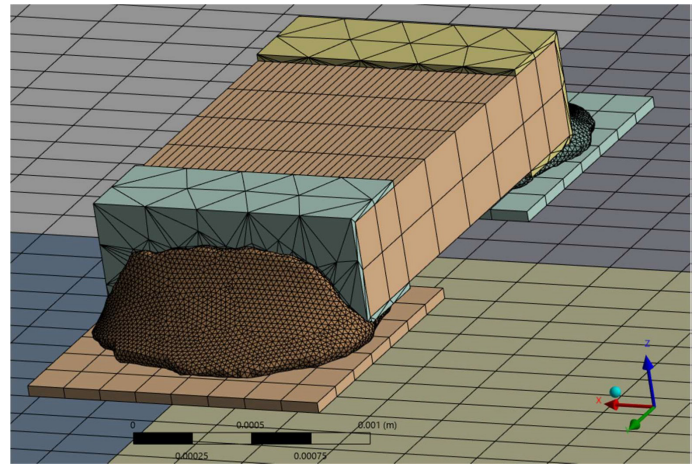
A megfelelő felületi minőség elérését követően a komponens és a pad pontos helyzetének meghatározása után, logikai kivonási művelettel (Boolean subtract) távolítottuk el az átfedésben lévő térfogatokat a forraszból, ezáltal biztosítva a geometriai átfedések megszüntetését és a megfelelő mechanikai illeszkedést a szimulációs térben.

A geometriai modell optimalizálása a mechanikai és elektromos funkcióval nem rendelkező forraszmaradványok és az izolált anyagcseppek eltávolításával folytatódott. A visszamaradó felületi rendellenességek automatikus javítását követően a forrasz geometriáját egy zárt burkolófelület létrehozásával egységesítettük (paraméterek: 0,03 mm elsődleges és 0,1 mm másodlagos felbontás, 40°-os küszöbszög). Ez a lépés egy egyenletes, a további végeleemes hálózashoz alapot biztosító felületet eredményezett (4. ábra). A vizsgálatokhoz elengedhetetlen térfogati testté történő konvertálás után a komponenst a forraszba illesztettük, végül definiáltuk az ellenállás és az ónozott csatlakozófelületek közötti mechanikai kontaktusokat.

**4. ábra:** Forraszkötések a burkolófelület létrehozása után

A következő fázisban önálló modellként megterveztük a nyomtatott áramköri lapot és a hozzá tartozó csatlakozó felületeket. A végeleemes háló megfelelő kialakítása érdekében definiáltuk az egyes térfogati testek közötti kapcsolatokat. Végül a kész NYÁK modellt beemeltük a fő szerelésbe és elhelyeztük rajta a forrasz-komponens részegységet. A teljes összeállítás (5. ábra) geometriai modelljének véglegesítésével lezárult az előkészítő szakasz, lehetővé téve a szimulációs vizsgálatok megkezdését.

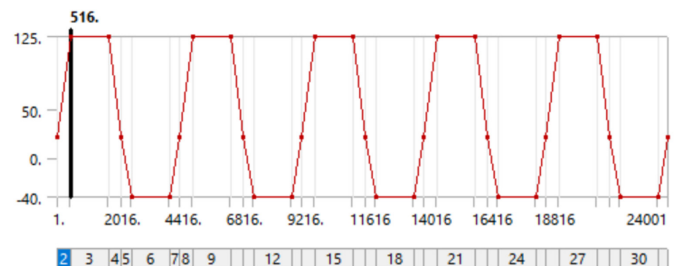
A termomechanikai szimulációk elkészítése Ansys Mechanical környezetben történt. A számítási kapacitás optimalizálása céljából a nyomtatott áramköri lap kiterjedését a vizsgált komponens közvetlen környezetére korlátoztuk. A modell kinematikai megfogását a NYÁK felületén

**5. ábra:** Teljes összeállítás

három ponton, statikailag határozott módon biztosítottuk (X-Y-Z, X-Z, és Z irányú gátlásokkal), elkerülve a hőtágulás akadályozásából fakadó feszültségeket.

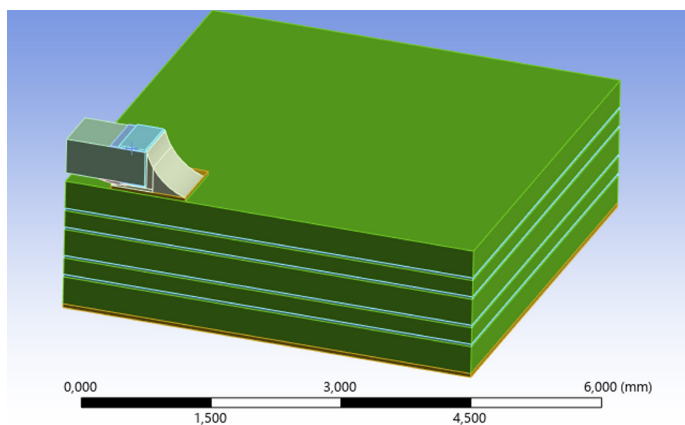
A végeleemes háló felépítése során a reguláris térfogatokat (NYÁK, pad, komponens) hexaédes, a forraszanyagot tetraédes elemekkel diszkretizáltuk. A megfelelő konvergencia és a numerikus hibák csökkentése érdekében az érintkező felületek környezetében lokális hálósűrítést alkalmaztunk.

A modell öt ciklusból álló tranziens hőterhelést kapott, a terhelés 22°C-os kezdeti hőmérsékletről indult, és -40°C, illetve 125°C szélsőértékeket tartalmazott, 15 perces hőtartási időekkel (6. ábra). A forraszanyag ciklikus termomechanikai fáradásának modellezésére hőmérsékletfüggő elasztoplasztikus anyagmodellt alkalmaztunk Chaboche-féle keményedési modellel. A megoldó fázis után kiértékeljük a teljes összeállítás globális és irányonkénti deformációit, valamint a forraszanyagban ébredő von Mises-egyenértékű feszültségeket és az akkumulált képlékeny alakváltozásokat.

**6. ábra:** Hőciklus az idő függvényében

2.4 Ideális modell

A két geometriai modell összehasonlíthatósága érdekében elkészítettük a beforrasztott alkatrész ideális modelljét is (7. ábra). A számítási idő csökkentésének érdekében elegendő volt egy negyedmodellt szimulálni, mivel a modell az x- és az y-tengelyre nézve is szimmetrikus. Az idealizált modellben ugyanazokat az anyagmodelleket, NYÁK-méreteket és hőciklus-paramétereket alkalmaztunk.



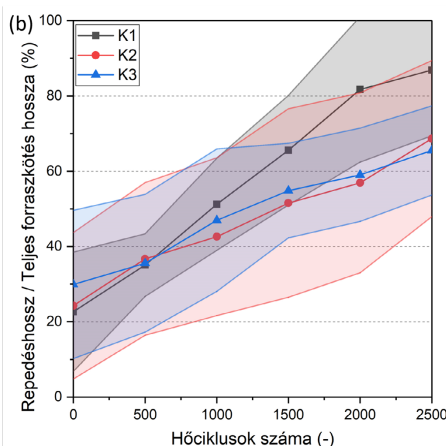
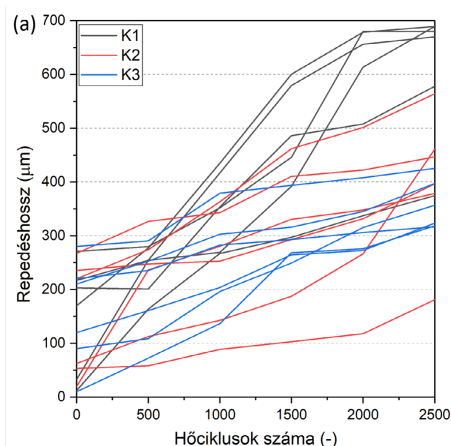
7. ábra: Ideális modell

2.5 Anyagállandók és anyagmodellek

A termomechanikai szimulációk során a különböző alkatrészekhez hőmérséklet- és irányfüggő anyagmodelleket alkalmaztunk. A szimulációban részt vevő alkatrészek legfontosabb, szobahőmérsékleten (22 °C-on) érvényes anyagállandóit a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat: A végelelemes vizsgálathoz felhasznált anyagállandók (22 °C-on)

Alkatrész/Anyag	Rugalmassági modulus (GPa)	Poisson-tényező (-)	Hőtágulási együttható (ppm/°C)	Anyagmodell típusa
Forrasztanyag/Innot	44	0,36	21	Elastoplasztikus (Chaboche-féle kinematikai keményedéssel)
Komponens	320	0,23	7	Izotróp lineáris elasztikus
NYÁK hordozó/FR-4	22 (x/y irány) 7,8 (z irány)	0,20	15	Ortotróp lineáris elasztikus
Érintkező felület (pad)/Réz (Cu)	64	0,35	17	Izotróp lineáris elasztikus



8. ábra: a) Repedéshosszak és b) repedéshossz teljes kötőhosszhoz viszonyított aránya szórás sávokkal a hőciklusok függvényében

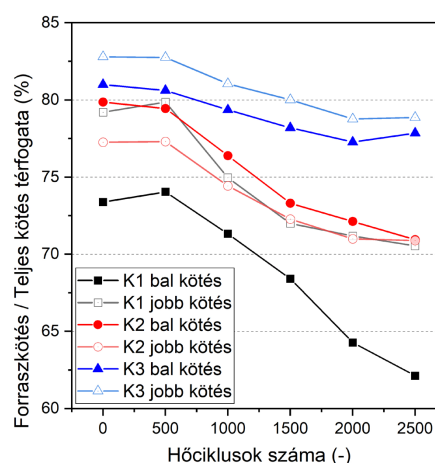
3. Eredmények

3.1 Repedéshossz

A termikus ciklusok előrehaladtával új repedések jelentek meg, miközben a meglévő repedések fokozatosan növekedtek. A repedések komplex morfológiával rendelkeznek, nehéz meghatározni, melyik repedés vezet a végső mechanikai és elektromos tönkremenetelhez. A 8. a) ábrán látható, hogy a három vizsgált komponens két forraszkötésében kiválasztott három síkban (összesen 6 görbe komponensenként) hogyan változnak a repedéshosszak a termikus ciklusok függvényében. A 8. b) ábrán pedig a mért repedéshosszakat a teljes kötőhosszra normáltuk, majd átlagoltuk, így kapjuk meg a százalékos repedéshosszváltozást.

3.2 Forraszkötés és teljes térfogat aránya

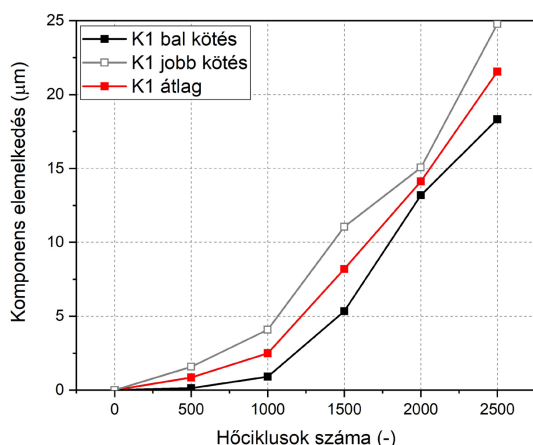
A 9. ábrán látható, hogy a hőciklusok függvényében hogyan változik a forraszkötés és a teljes térfogat aránya. A görbék egy kezdeti szakaszt követően közel lineárisan csökkennek a hőciklusszám növekedésével. Ez a közel lineáris tendencia arra utal, hogy a vizsgált időszakban a forraszkötés degradációjának üteme közel állandó, ami potenciálisan alkalmassá teheti a mérőszámot a hátralévő hasznos élettartam becslésének támogatására.



9. ábra: A forraszkötés és a teljes térfogat aránya a termikus ciklusok függvényében

További kulcsfontosságú megfigyelés a görbe kezdeti szakaszában – konkrétan megközelítőleg az 500. termikus ciklusig – mutatkozó plató jelenléte. Ez egy kezdeti inkubációs szakasz jelenléte utalhat, amely során a vizsgált térfogati mérőszámban még nem jelentkezik számottevő változás. A degradációs folyamat láthatóan csak ezen kezdeti stabilizációs fázist követően indul meg vagy gyorsul fel.

Az inkubációs szakaszt követően, körülbelül az 500. és az 1500. ciklus között a térfogati arány közel lineárisan csökken, ami ebben az intervallumban

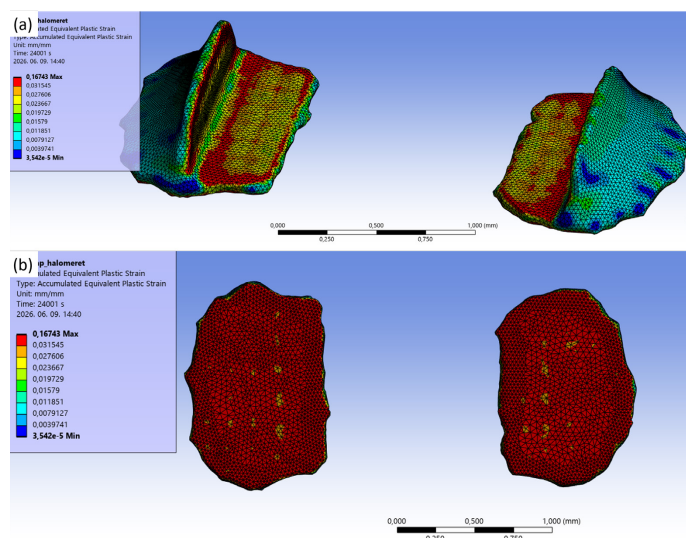


10. ábra: A komponens elemelkedése a hőciklusok függvényében

állandó degradációs ütemre utal. Ugyanakkor az 1500. és 2000. ciklus közötti utolsó szakaszban mindegyik görbe esetében törés figyelhető meg: a csökkenés üteme lelassul, a görbe meredekségének abszolút értéke csökken. Ez a jelenség arra utal, hogy egy bizonyos idő elteltével a degradációs folyamat sebessége mérséklődik, ami kulcsfontosságú tényező a hátralévő hasznos élettartam pontos előrejelzésében.

3.3 Komponens elemelkedés

A komponens elemelkedését a hőciklusok függvényében a 10. ábra mutatja be. Látható, hogy a mérési pontok gyorsuló, exponenciális jellegű növekedést mutatnak, tehát kezdetben lassan, majd a hőciklusok számának növekedésével egyre gyorsabban növekszik a komponens és a NYÁK közötti távolság. Ez a növekedés összhangban van a forraszkötés és teljes kötés térfogat arányának változásával, hiszen a térfogati arány csökkenésével a komponens egyre könnyebben mozdulhat el, ami végső soron az alkatrész tönkremeneteléhez, illetve a forraszkötés teljes leválásához vezethet.



11. ábra: A felhalmozódott egyenértékű képlékeny alakváltozás eloszlása a) felülnézetből és b) alulnézetből a forraszkötésekben a valós modellben

3.4 Szimuláció

A 2.3 fejezetben ismertetett módon öt hőciklust szimuláltunk, és az eredményeket az ötödik ciklus végén, szobahőmérsékleten, a forraszkötésre vonatkozóan értékeltük. Az összehasonlításhoz a teljes deformációt, von Mises-egyenértékű feszültséget és a felhalmozódott egyenértékű képlékeny alakváltozást használtuk fel.

A valós forraszgeometria alapján készült modell esetében látható, hogy a komponens alatti, komponens melletti, valamint a réz csatlakozófelülethez (padhez) kapcsolódó régióban alakult ki a legnagyobb felhalmozódott képlékeny alakváltozás (11. ábra). Ez összhangban van az XRM-felvételek alapján megfigyelt repedésindulási helylyel, mivel a repedés a komponens alatti régióban indul meg és a komponens mellett terjed tovább.

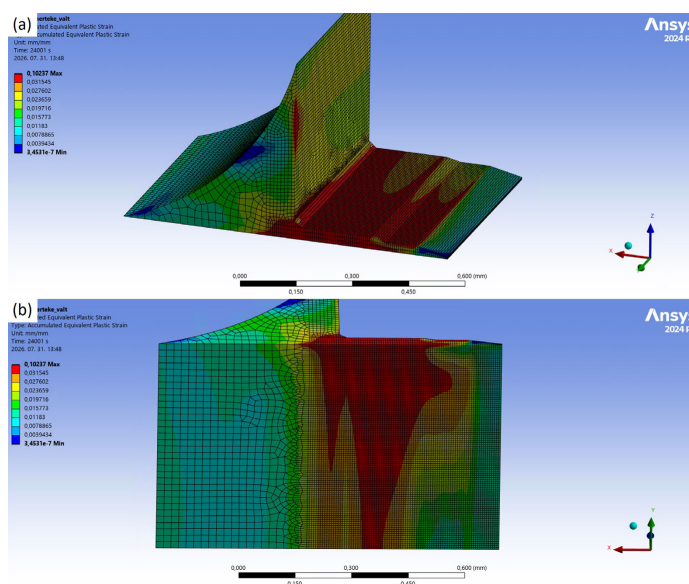
A teljes deformáció $0,76\mu\text{m}$ volt, ami 62%-kal magasabb, mint az ideális geometriájú modellben. A valós, szabálytalan felületen (pl. élesebb bemetszések, durvább felület) a termikus ciklusok során könnyebben és nagyobb mértékben lép fel lokális képlékeny alakváltozás. Mivel a képlékeny alakváltozás visszafordíthatatlan, ezek a lokális deformációk összegződve nagyobb globális maradó elmozdulást eredményeznek a ciklus végén. Különösen az Y-irányú növekedés utal arra, hogy a geometria ebben az irányban a legérzékenyebb a deformáció felhalmozódására. A 39%-kal magasabb egyenértékű képlékeny alakváltozás (16,7% vagy $0,167$) a valós modellben egyértelműen jelzi, hogy a valós geometria mentén az anyag sokkal nagyobb mértékben deformálódott. Ez a paraméter fontos bemenő változó lehet a fáradásos élettartam-bebecslési modellekben, például a Coffin-Manson- vagy Darveaux-alapú megközelítésekben.

3.5 Az ideális (CAD-) modell szimulációs elemzése

Az analízis során a modellben fellépő maximális von Mises-egyenértékű feszültség elérte a $41,1\text{MPa}$ -os értéket. Ez a magas, lokalizált feszültségcsúcs a geometria éles sarkaiban, különösen a forraszkötés és az alaplemez találkozásánál jelentkezett, ami feltehetően az idealizált geometria éles sarkaiban kialakuló feszültségkoncentráció következménye. A teljes deformáció maximális értéke ezzel szemben alacsony, $0,29\mu\text{m}$ maradt.

A képlékeny alakváltozás szempontjából a legfontosabb eredmény a felhalmozódott egyenértékű képlékeny alakváltozás eloszlása, amelyet a 12. ábra szemléltet. Az ábrán látható, hogy a legmagasabb alakváltozás a forraszkötés geometriai szempontból kritikus területein koncentrálódik. A szimuláció végére a maximális felhalmozódott képlékeny alakváltozás elérte a $0,102\text{m/m}$ értéket. A deformációs zóna eloszlása viszonylag homogén, ami a szabályos geometriára vezethető vissza és nem mutatja azokat a komplex, szabálytalan deformációs góccokat, amelyek a valós forraszkötés szabálytalan geometriai morfológiájából adódhatnak.

A numerikus modell felépítése során egy rendkívül sűrű, strukturált hálót alkalmaztunk, amely összesen $292\,439$ elemből állt. A nagy elemszám, bár biztosította a numerikus



12. ábra: A felhalmozódott egyenértékű képlékeny alakváltozás eloszlása a) felülnézetből és b) alulnézetből a forraszkötésekben az ideális modellben

pontosságot, jelentős számítási kapacitást igényelt, a szimuláció futási ideje meghaladta a 30 órát. Ez rávilágít arra a kompromisszumra, hogy az idealizált modellek pontosságának növelése a hálósűrítésen keresztül rendkívül számításiigényes lehet.

3.6 Eredmények összehasonlítása és értékelése

A két végeelemes modell – a röntgenmikroszkópos felvételek alapján rekonstruált valós geometriájú, valamint az idealizált, CAD-alapú modell – eredményeinek összehasonlítása jelentős különbségeket tárt fel, rávilágítva a geometria egyszerűsítésének hatásaira. Az eredmények áttekintését 3. táblázat foglalja össze, amelyben a különbségeket a valós modellhez viszonyítottuk.

3. táblázat: A vizsgált paraméterek a valós és ideális modellekben, valamint a különbségük a valós modellhez viszonyítva

Paraméter	Valós modell	Ideális modell	Eltérés a valós modellhez képest (%)
Felhalmozódott képlékeny alakváltozás	0,167 m/m	0,102 m/m	-39 %
Teljes deformáció	0,76 μm	0,29 μm	-62 %
Maximális egyenértékű feszültség	15,3 MPa	41,1 MPa	169 %
Komponens elemelkedés	$0,43 \times 10^{-2} \mu\text{m}$	$3,15 \times 10^{-2} \mu\text{m}$	633 %
Elemek száma a teljes modellben	58 087 db	292 439 db	403 %
Elemek száma a forraszkötésben	47 112 db	74 251 db	58 %
Számítási idő	3,9 óra	30,0 óra	670 %

A valós geometriát használó modell lényegesen magasabb felhalmozódott képlékeny alakváltozást mutatott, ami az élettartam-becslés szempontjából kritikus paraméter. Ezzel párhuzamosan a teljes deformáció is több mint kétszeresére nőtt az ideális modellhez képest. Ezek az eredmények arra utalnak, hogy a valós geometria komplexitása és szabálytalanságai olyan helyi deformációs zónákat hoznak létre, amelyeket egy idealizált modell nem képes előrejelezni.

Érdekes módon az egyenértékű feszültség csúcsa az ideális modellben volt szignifikánsan magasabb. Ez valószínűleg az idealizált geometria éles sarkaiból vagy simított felületeiből adódó feszültségkoncentráció következménye. A valós modell ezzel szemben jobban eloszlatja a feszültségeket a komplexebb felületi morfológiának köszönhetően.

A legnagyobb különbség a komponens elemelkedésben figyelhető meg. Míg a valós modellben a komponens kis mértékben mozdul el 5 ciklus után, addig az ideális modell esetén ez az érték már számottevő. A valóságban a komponens szintén csak kis mértékben mozdul el, mégpedig $0,86 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ mértékben, ha csak az első 5 ciklusra vetítjük az elmozdulásokat. Ez az érték jóval közelebb esik a valós geometrián alapuló szimulációhoz.

Az eredmények azt mutatják, hogy a röntgenmikroszkópos felvételekből rekonstruált valós geometria alkalmazása jelentősen befolyásolja a forraszkötések numerikusan meghatározott mechanikai válaszát, ezért ígéretes alapot jelenthet az élettartam-becslési modellekhez. A jelen vizsgálatban alkalmazott idealizált modell a feszültségcsúcsok túlbecslését és a képlékeny alakváltozás alulbecslését eredményezte, ami az élettartam-becslés során nem konzervatív következtetésekhez vezethet.

4. Összefoglalás

A fent bemutatott eredmények alapján az alábbi következtetéseket vonhatjuk le:

- A termikus ciklusok előrehaladtával új repedések jelennek meg, és a meglévő repedések növekednek, miközben a forraszkötés és teljes térfogat aránya egy kezdeti (~500 ciklusos) inkubációs szakasz után közel lineárisan csökken.
- A valós geometrián alapuló modellben a legnagyobb felhalmozódott képlékeny alakváltozás a komponens alatti és melletti régiókban alakult ki, összhangban a kísérletileg megfigyelt repedésindulási helyekkel.
- Az ideális modell értéke kb. 39%-kal kisebb a valós modellénél (0,167 m/m) és 62%-kal nagyobb teljes deformációt (0,76 μm) eredményezett, mint az idealizált CAD-modell.
- Az idealizált modell 169%-kal magasabb maximális von Mises-feszültséget mutatott (41,1 MPa), ami feltehetően az idealizált geometria éles átmeneteiben kialakuló mesterséges feszültségkoncentrációkkal magyarázható.
- A komponens elemelkedésének mértéke a két modellben jelentősen eltért; a valós modell eredménye közelebb állt a mért elmozdulásokhoz.

- A valós geometria alkalmazása jelentősen eltérő és a kísérleti megfigyelésekhez jobban illeszkedő mechanikai választ eredményezett, miközben a számítási idő is jelentősen csökkent (3,9 óra vs. 30 óra).

Összességében a röntgenmikroszkópos felvételekből rekonstruált valós geometria a forraszkötések termomechanikai viselkedésének az idealizált CAD-modellnél részletesebb és a kísérleti megfigyelésekhez jobban illeszkedő numerikus leírását tette lehetővé.

Köszönetnyilvánítás

A KDP-IKT-2023-900-I1-00000957/0000003 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a KDP-2023 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Szeretném megköszönni a Robert Bosch Kft.-nek a kutatás szakmai támogatását.

Irodalomjegyzék

- [1] K. Zeng, K.N. Tu, Six cases of reliability study of Pb-free solder joints in electronic packaging technology, *Mater. Sci. Eng. R Reports* 38 (2002) 55–105. [https://doi.org/10.1016/s0927-796x\(02\)00007-4](https://doi.org/10.1016/s0927-796x(02)00007-4)
- [2] J.H. Lau, State of the Art of Lead-Free Solder Joint Reliability, *J. Electron. Packag.* 143 (2021). <https://doi.org/10.1115/1.4048037>.
- [3] B. Bodi, V. Gonda, Characterization of Thermal Behavior of Lead-Free SAC305 Solder for Optimal Manufacturing in Soldering Processes, *CANDO-EPE 2024 - Proc. IEEE 7th Int. Conf. Work. Obuda Electr. Power Eng.* (2024) 323–329. <https://doi.org/10.1109/CANDO-EPE65072.2024.10772927>.
- [4] W.W. Lee, L.T. Nguyen, G.S. Selvaduray, Solder joint fatigue models: Review and applicability to chip scale packages, *Microelectron. Reliab.* 40 (2000) 231–244. [https://doi.org/10.1016/s0026-2714\(99\)00061-x](https://doi.org/10.1016/s0026-2714(99)00061-x).
- [5] R.J. Coyle, K. Sweatman, B. Arfaei, Thermal Fatigue Evaluation of Pb-Free Solder Joints: Results, Lessons Learned, and Future Trends, *Jom* 67 (2015) 2394–2415. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1595-1>.
- [6] S. Hamasha, Y. Jaradat, A. Qasaimeh, M. Obaidat, P. Borgesen, Assessment of Solder Joint Fatigue Life Under Realistic Service Conditions, *J. Electron. Mater.* 43 (2014) 4472–4484. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3436-3>.
- [7] D.-P. Tran, T.-W. Lin, K.-C. Shie, C. Chen, Non-destructive micro analysis of electromigration failures in solder microbumps using 3D X-ray computed tomography, *Mater. Charact.* 194 (2022) 112404. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112404>.
- [8] Y. Su, J. Shi, Y.-M. Hsu, D.-Y. Ji, A.D. Suer, J. Lee, Volumetric nondestructive metrology for 3D semiconductor packaging: A review, *Measurement* 225 (2024) 114065. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.114065>.
- [9] Y. Su, W. Ma, Y. (Michael) Yang, Perovskite semiconductors for direct X-ray detection and imaging, *J. Semicond.* 41 (2020) 051204. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/41/5/051204>.
- [10] B.C. Wolz, C. Jaremenko, F. Vollnhals, L. Kling, J. Wrege, S. Christiansen, X-ray microscopy and automatic detection of defects in through silicon vias in three-dimensional integrated circuits, *Eng. Reports* 4 (2022). <https://doi.org/10.1002/eng2.12520>.
- [11] C. Schmidt, 3-D X-Ray Imaging With Nanometer Resolution for Advanced Semiconductor Packaging FA, *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.* 8 (2018) 745–749. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2827058>.
- [12] Y.W. Chang, Y. Cheng, F. Xu, L. Helfen, T. Tian, M. Di Michiel, C. Chen, K.N. Tu, T. Baumbach, Study of electromigration-induced formation of discrete voids in flip-chip solder joints by in-situ 3D laminography observation and finite-element modeling, *Acta Mater.* 117 (2016) 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.059>.
- [13] M.B. Kelly, S. Niverty, N. Chawla, Four dimensional (4D) microstructural evolution of Cu6Sn5 intermetallic and voids under electromigration in bi-crystal pure Sn solder joints, *Acta Mater.* 189 (2020) 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.02.052>.
- [14] T. Bubonyi, P. Barkóczy, Z. Gácsi, Comparison of CT and metallographic method for evaluation of microporosities of dye cast aluminum parts, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 903 (2020) 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/903/1/012038>.
- [15] A. Kemény, B. Leveles, T. Bubonyi, I.N. Orbulov, Effect of particle size and volume ratio of ceramic hollow spheres on the mechanical properties of bimodal composite metal foams, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 140 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106152>.
- [16] E. Maire, P.J. Withers, Quantitative X-ray tomography, *Int. Mater. Rev.* 59 (2014) 1–43. <https://doi.org/10.1179/1743280413Y.0000000023>.
- [17] S. Jónás, M. Tisza, Finite Element Modelling of Clinched Joints, *Adv. Technol. Mater.* 43 (2018) 1–6. <https://doi.org/10.24867/ATM-2018-1-001>.
- [18] M.A. Dudek, L. Hunter, S. Kranz, J.J. Williams, S.H. Lau, N. Chawla, Three-dimensional (3D) visualization of reflow porosity and modeling of deformation in Pb-free solder joints, *Mater. Charact.* 61 (2010) 433–439. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2010.01.011>.
- [19] E. Padilla, V. Jakkali, L. Jiang, N. Chawla, Quantifying the effect of porosity on the evolution of deformation and damage in Sn-based solder joints by X-ray microtomography and microstructure-based finite element modeling, *Acta Mater.* 60 (2012) 4017–4026. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.03.048>.
- [20] M.R. Chowdhury, S. Ahmed, A. Fahim, J.C. Suhling, P. Lall, Mechanical characterization of doped SAC solder materials at high temperature, in: 2016 15th IEEE Intersoc. Conf. Therm. Thermomechanical Phenom. Electron. Syst., IEEE, 2016: pp. 1202–1208. <https://doi.org/10.1109/ITHERM.2016.7517684>.
- [21] IPC-9701B Thermal cycling Test Method for fatigue Life Characterization of Surface Mount Attachments, 2022.