



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikai Technológia Tanszék

ELTEMETETT STRUKTÚRÁT TARTALMAZÓ ÜVEG- KERÁMIA (LTCC) HORDOZÓ TECHNOLÓGIÁJA

PHD TÉZISFÜZET

Horváth Eszter

Tanszékvezető: Dr. Harsányi Gábor egyetemi tanár
Témavezető: Dr. Harsányi Gábor egyetemi tanár

BUDAPEST
2012

A kutatás előzménye

Napjainkban a nagy megbízhatóságú, miniatürizált elektronikai alkalmazásoknál a nagy integritású (rétegeltenállást és kondenzátort is tartalmazó), a hagyományos nyomtatott huzalozású lemez (NYHL) műanyagoknál jobb mechanikai tulajdonságokkal bíró kerámia, illetve üveg-kerámia hordozókat gyakran használnak. Az üveg-kerámia (vagy más néven Low Temperature Co-fired Ceramics, röviden LTCC) hordozók széleskörű elterjedése jellemző ezen a területen a magas hőmérsékleten égetett tiszta kerámiákkal szemben. Jelenleg LTCC hordozókat is használnak az űrkutatásban, teljesítményelektronikában, bizonyos orvosi alkalmazásoknál (hallókészülék, pacemaker), a hadiiparban, az autóiiparban (blokkolásgátló, elektronikus menetstabilizátor) és egyes telekommunikációs (wifi és bluetooth) eszközökben. Az LTCC hordozót gyakran alkalmazzák mikrorendszerekben is kiváló fizikai és kémiai tulajdonságai miatt (pl.: kémiai inaktivitás, hermetikusság, hőtágulási együtthatója közel megegyezik a szilíciuméval, magas hőmérsékleten is stabil). Fontos szempont a kémiai és bioszenzorok esetén, hogy azok minél kisebb mintából tudjanak információt kinyerni, kezelni, hiszen az eszköz méretcsökkentésén túl a mintából gyakran igen kis mennyiség áll rendelkezésre. Ezért a három dimenziós struktúrák kivitelezésére alkalmas LTCC technológiát gyakran alkalmazzák szenzorok és mikrofluidikai eszközök hordozójaként is, továbbá lehetőséget nyújt arra, hogy a mintát kezelő eszköz és a feldolgozó elektronika egy modulban legyen. A feldolgozó elektronika jelentős részét lehetőség nyílik a hordozóba temetni belső vezetékezés, eltemetett kondenzátorok, induktivitások és ellenállások segítségével, mellyel jelentős méretcsökkenés érhető el. A felületi és eltemetett passzív elemek kialakítására az LTCC rétegfelviteli technológiája a szitanyomtatás, mely az egyik legegyszerűbb és mindemellett olcsó rajzolatalkalaktív megoldás. Azonban a passzív elemek tulajdonságait nagyban befolyásolja a nyomtatás minősége, ezért nagy figyelmet kell fordítani a nyomtatási paraméterek és a kés helyes megválasztására.

Az LTCC-ben a mikrofluidikai elemek megvalósításának kulcsfontosságú lépése a csatornakialakítás. A fluidikai eszköz legfontosabb gyártási lépéseit, mint a préselés és a kiégetés, korábban empirikus úton optimalizálták, a folyamat fizikai-kémiai hátterét nem kutatták. A többrétegű hordozó belsejében kialakított csatornát a rétegeken kivágott ablak-struktúra egymásra illesztése után a „pakett” laminálásával hozzuk létre. Préselés alatt a nyomás az üregek behorpadását okozhatja, ennek kiküszöbölésére laminálás előtt a csatorna deformációjának csökkentésére az üreget ún. áldozati anyaggal töltik ki. Ezután a többrétegű hordozót szinterelik, amely során az üveg-kerámia hordozóból elpárolognak, ill. kiégnek a szerves vegyületek, továbbá

az üvegmátrix megömlik és összefolyik. Ezek hatására a hordozó zsugorodik, és szerkezete megszilárdul. Együttégethető csatornakitöltő anyagok használata egyszerűbb, mert kiégetés előtt nem kell eltávolítani, de kiégetésnél a gyártó által LTCC-hez javasolt hőprofil módosítani kell, hogy a csatornában lévő áldozati anyagok maradéktalanul eltávozzanak a struktúra károsítása nélkül.

A szakirodalom áttekintése alapján megállapítottam, hogy az előbbieken említett jelenségeket a préselés, szitanyomtatás, illetve kiégetés során leginkább tapasztalati úton, hiányosan, vagy nagy elhanyagolásokkal vizsgálták, ezért az eltemetett struktúrát tartalmazó LTCC hordozó megvalósításának ezen folyamataira fordítottam különös figyelmet.

A kutatási terület egyes megoldandó problémái

A szitanyomtatás egyik fő problémája a szita rövid élettartama, melyet a rosszul beállított paraméterek tovább rontanak. Ezt a technológiát a 60-as évek óta próbálják optimalizálni. Az első empirikus úton való paraméteroptimalizálás [1] után megjelentek a matematikai modellek [2, 3], de nem vették figyelembe a szita rugalmasságát, illetve a geometria hatását sem a szita sem a kés szempontjából. Kutatásokat végeztek a kés geometriájának fejlesztésére, de a problémát általában nem lehet a felhasználásra szánt szita geometriája nélkül kezelni. A szitanyomtatás másik fontos paramétere a kontakttávolság, melynek helyes megválasztásával elkerülhető a szita letapadása, illetve a szita túlfeszítése.

A csatornát tartalmazó LTCC hordozó technológiájának kritikus pontja a préselés, amelynek során a deformáció kiküszöbölésére alacsonyabb nyomást alkalmaznak az előírtnál [4,5]. Ennek hatására a csatorna ugyan kevésbé horpad be, de a rétegek közötti delamináció esélye nő. A delamináció mértékét csökkenteni lehet a rétegek közé felvitt ragasztóanyag használatával [6], de ez további problémákat eredményez, pl.: ha nem egyenletesen viszik fel a kötőanyagot vagy nem megfelelő vastagságú. Mindezek mellett a felvitel egy további technológiai lépést igényel. A hagyományos préselési nyomás esetén viszont rendszerint deformálódik a csatornát fedő réteg [7]. Erre megoldásként a kutatásokban különféle áldozati anyagokat alkalmaztak kitöltés céljára és vizsgálták a horpadás mértékét, de ezzel párhuzamosan nem vették figyelembe a csatorna geometriájának hatását. A laminálási paraméterek optimalizálásánál keresztmetszeti csiszolattal vizsgálják a csatorna horpadását, de így a rétegek közötti delaminációról nem kapunk teljes képet. Az irodalomban napjainkig használatos „trial-and-error” jellegű technológia-optimalizálást használják a különböző geometriájú eltemetett csatornák megvalósításához szükséges technológiai paraméterek meghatározására. Ahhoz, hogy a préselési folyamatot

egészében tudjuk vizsgálni, szükség van a hordozó, illetve az áldozati anyag – ez esetben keményítő - mechanikai viselkedésének ismeretére. Habár az LTCC hordozót közel 30 éve használják, nem vizsgálták a nyers hordozót mechanikai behatásra. Sokféle vizsgálatot végeztek a keményítő fizikai paramétereinek meghatározására, hiszen mind a vegyipar mind az élelmiszeripar fontos alapanyaga. Számtalan keményítő típus van kereskedelmi forgalomban, melyeknek eltérő a szemcseszerkezete és ezáltal a fizikai, kémiai, mechanikai tulajdonságaik is. A gyógyszergyártás egyik fő alapanyaga a keményítő, melynek kevés információt szolgáltató mechanikai vizsgálatával a gyógyszeripar is foglalkozott már - kalapácsütések illetve nyomás hatására végbemenő térfogatváltozás vizsgálata [8-11]. Ez a módszer viszont nem tette lehetővé a keményítő képlékenységi paramétereinek meghatározását, ami a préselési folyamat alatti alakváltozás leírásának feltétele. Szemcsés anyagok esetén további mechanikai paraméterek határozhatók meg az ún. „nyíródobozos” méréssel úgy, mint pl. a belső súrlódási szög és a kohézió. A képlékenységi feltétel megadásához ismerni kell még, hogy mennyi levegőt tartalmaz a laza szerkezetű keményítő.

A technológia másik fontos paramétere a megfelelő hőprofil beállítása. Itt is nagy szerepet játszik az alkalmas áldozati anyag megválasztása. Csak olyan anyag használható, amely kiégetés során maradéktalanul eltávozik az üregből, és nem lép reakcióba a nyers üveg-kerámia hordozóval. A kiégetési hőprofil meredekségének mérséklésével csökkenthető az áldozati anyagból időegység alatt képződő gáz mennyisége, mely károsíthatja a struktúrát. Bizonyos (szén bázisú) áldozati anyagok esetén a kiégetési közeg inert gáz/oxigén arányának változtatásával is mérsékelni lehet a képződő gáz mennyiségét [8]. Viszont a csatornát tartalmazó LTCC hordozó esetén, figyelembe kell venni az együttégethető áldozati anyag bomlási tulajdonságait is, mert az anyagból adott esetben hirtelen felszabaduló gázok károsíthatják a csatornát. Bomlási modell nélkül, illetve egy modell ellenőrzése nélkül nem kaphatunk megbízható eredményeket.

Célkitűzés, kutatás módszerei

Áttekintve a fenti kutatási területek főbb hiányosságait és nyitott kérdéseit, az alábbi célokat tűztem ki:

- a szita élettartamának meghosszabbítását, a nyomtatási minőség megőrzése mellett,
- a szitanyomtató kés geometriájának optimalizálását, a szitában ébredő feszültség csökkentése érdekében,

- roncsolásmentes vizsgálati technológia kidolgozását, mely teljes képet ad a laminátumról, és a fluidikai csatornát tartalmazó LTCC hordozó delaminációjának mértékéről, valamint ezek alapján optimalizálni a préselés paramétereit,
- az LTCC és a keményítő mechanikai paramétereinek meghatározását,
- olyan modell kidolgozását, mellyel adott geometriájú csatornához meghatározható az áldozati anyag típusa (por, szilárd anyag) és a várható deformáció mértéke,
- a hőprofil beállításának optimalizálását az áldozati anyag termikus analízisének figyelembe vételével.

Új tudományos eredmények

1. Téziscsoport: A kés alakjának szerepe a szitában fellépő feszültségre és a szita feszesség csökkenésének kompenzációja a kontaktávolság módosításával.

I. tézis: Végeelemes analízis valamint a direkt emulziós maszkkal ellátott rozsdamentes acél szita deformációjának terhelés alatti mérése alapján optimálisan kialakított késalak alkalmazásával a szitában kialakuló feszültség mértéke 50%-kal csökkenthető.

A vizsgálathoz végeelem modellt készítettem, melyhez a szita rugalmassági paramétereit a módosított Voigt szabályt felhasználva határoztam meg. A szita feszességét olyan x és y irányú elmozdulás-kényszerrel adtam meg, mely az adott előfeszítettség vonalfeszültségének felel meg. Modelleztem különböző késterhelés (40-80 N) hatására fellépő szita deformációt 11 különböző helyen, mely eredményét kísérleti vizsgálatokkal ellenőriztem. A méréshez saját eszközt készítettem, mely alkalmas a szita deformációjának vizsgálatára különböző terhelések esetére. Ezután a modellbe beillesztettem az általánosan alkalmazott kontaktávolságot és kiszámítottam a szitában fellépő feszültség eloszlását. A hagyományosan alkalmazott (lekerekítés nélküli) kés sarokpont miatt a szitában fellépő feszültség itt összpontosul. A kés sarokpont lekerekítési rádiuszának megfelelő megválasztásával a szitában fellépő feszültséget jelentősen (közel 50%-kal) csökkentettem, mellyel a szita várható élettartama megnőtt.

A tézisponthoz kapcsolódó publikációk: L1, L2, L7

II. tézis: Direkt emulziós maszkkal ellátott rozsdamentes acél szita optimális nyomtatási képének megtartása érdekében függvénykapcsolatot határoztam meg a szitafeszesség és a szita - hordozó közötti távolság között a szitafeszesség 2-3 N/mm tartományán.

Szitanyomtatás során a kés elhaladása után a szita elválik a hordozótól legyőzve a paszta és a szita közti adhéziót. Az ismételt szitanyomtatás hatására a szita feszessége csökken, ezért a szitát az eredeti pozíciójába visszatérítő erő is lecsökken. Ennek következményeként a rajzolat elmosódottá válik, mely korrigálható a kontakttávolság növelésével. A végeelem modellben a csökkent szitafeszességi értékekkel vizsgáltam, hogy az eredetileg 1 mm-es kontakttávolságot hogyan kell módosítani, hogy a 3N/mm-ről lecsökkent szita feszesség mellett a szita visszatérítő ereje állandó legyen. Modellem segítségével megadható a megfelelő szita-hordozó távolság a szitafeszesség függvényében, így a nyomtatott rajzolat nem kenődik el.

A tézisponthoz kapcsolódó publikációk: L1, L2, L7

2. Téziscsoport: Képfeldolgozási eljárással kiegészített roncsolásmentes vizsgálati módszer az eltemetett csatornát tartalmazó LTCC hordozó laminálási paraméterek optimalizálására.

III/a. tézis: A delaminációs ráta fogalmának bevezetésével (delaminálódott terület és a hordozó területének aránya) olyan új vizsgálati módszert dolgoztam ki a laminálási paraméterek optimalizálására, melynek segítségével a delamináció mértéke kvantitatív módon minősíthető, melyet vizsgálatokkal is igazoltam.

Kidolgoztam egy akusztikus mikroszkópián alapuló, képfeldolgozási eljárással kiegészített vizsgálati módszert a fluidikai csatornát tartalmazó LTCC alapú hordozó préselési folyamatának roncsolásmentes minősítésére. A képfeldolgozó algoritmust Matlab környezetben készítettem. Bevezettem a delaminációs ráta fogalmát, amely a delaminálódott terület és a hordozó területének aránya. Az akusztikus mikroszkópos felvételeket a program segítségével kiértékelve meghatározott delaminációs ráta alapján a delamináció mértéke kvantitatív módon minősíthető.

A tézisponthoz kapcsolódó publikációk: L3

III/b. tézis: A delaminációs ráta számítási módszerének alkalmazásával a delamináció a vizsgált tartományon (hőmérséklet: 40-70 °C, nyomás: 10-20 MPa, idő: 5-15 perc) igazoltan elkerülhető, 20 MPa préselő nyomás, valamint 5 perces laminálási idő alkalmazásával.

A III/a pontban megfogalmazott vizsgálati módszert alkalmaztam a fluidikai csatornát tartalmazó LTCC alapú hordozó préselési folyamatának roncsolásmentes kvantitatív minősítésére, amely segítségével igazoltam, hogy a laminálás minősége függ az alkalmazott nyomástól, ellenben a laminálás időtartama számottevően nem befolyásolja a rétegelválások összterületét. Az előző megállapításokat figyelembe véve meghatároztam egy eltemetett struktúrát tartalmazó LTCC hordozó laminálási paramétereit.

A tézisponthoz kapcsolódó publikációk: L3, L8

IV. tézis: Létrehoztam egy mechanikai végeelem modellt, amely segítségével 1:10 (szélesség:hosszúság) aránynál nagyobb csatornageometria esetére a csatornahorpadás maximális értéke számítható, melynek mértékére küszöb szintet meghatározva eldönthető, hogy por vagy szilárd állagú áldozati anyagot szükséges alkalmazni.

Kidolgoztam egy végeelem alapú mechanikai modellt, fluidikai csatornát tartalmazó LTCC alapú hordozó préselési folyamatának leírására, amely alapján a csatorna geometriájának torzulása meghatározható, figyelembe véve az áldozati anyag deformációját. A csatorna deformációjának számításához nyomóvizsgálattal ill. nyíródobozos méréssel meghatároztam a keményítő (áldozati anyag) és az LTCC hordozó mechanikai anyagparamétereit. A keményítő feszültség-alakváltozás kapcsolata nemlineáris, az alakváltozás mértéke függ a hidrosztatikai feszültségtől. A keményítő képlékeny alakváltozásának leírására a Drucker-Prager modellt használtam. Az LTCC méréssel meghatározott feszültség-deformáció függvényét végeelem modellbe illesztettem, izotróp keményedési modellt és Mises-féle képlékenységi feltételt alkalmaztam. A modell alapján meghatároztam az LTCC alapú hordozóban kialakított csatornák optimális áldozati anyagának jellemzőit a csatorna szélességének függvényében, figyelembe véve az áldozati anyag alkalmazhatóságát továbbá az elméleti eredményt kísérleti úton igazoltam.

A tézisponthoz kapcsolódó publikációk: L4, L5, R1

V. tézis: Elméleti modellt alkottam a mikrofluidikai csatornát tartalmazó LTCC hordozó kiégetése közben áldozati anyagként alkalmazott keményítő bomlásának leírására, melynek segítségével meghatároztam a hordozó kiégetési hőprofiljába beiktatandó lassítási szakasz hosszát és meredekségét, így a felszabaduló gázképződés intenzitása korlátozható a csatorna károsodás elkerülése érdekében, amely hőprofil alkalmazhatóságát 45 mm-es csatornahosszig vizsgálatokkal igazoltam.

A modell alapján a kiégetés közben a keményítő bomlásának következtében kialakuló nyomás az anyag bomlásával együtt jelentkezik. Termikus analitikai méréseim eredményét kiértékelve megállapítottam, hogy a keményítő megfelel az Arrhenius típusú bomlási folyamatnak. Az anyag bomlása konszekutív jelleget mutat, így az azt leíró differenciálegyenlet rendszer megoldását numerikus módszer (Rosenbrock módszer) segítségével adtam meg. A kiértékeléshez a legkisebb négyzetek módszerét használtam, és ezek alapján meghatároztam a keményítő reakciókinetikai paramétereit, majd a számolás eredményét összevettem a mérési eredményekkel. A modellt felhasználva megadtam az LTCC hőprofiljába beiktatandó lassítási szakasz hosszát és meredekségét. Az új beállítások korlátozták a felszabaduló gázképződés intenzitását, de feleslegesen nem lassították a folyamatot és az új profillal készült minták nem károsodtak a kisebb nyomásnak köszönhetően.

A tézisponthoz kapcsolódó publikációk: L6, L8, K1

Az eredmények hasznosulása

Az **I. téziscsoportban (I. és II. tézis)** az LTCC technológiában alkalmazott rétegkialakítási eljárásnak, a szitanyomtatásnak a problémáit kutattam és javaslatot tettem a kés alakjának módosítására és a szitafeszesség csökkenésének kompenzálására a kontaktávolság változtatásával. A dolgozatomban ismertetett beállításokat a Robert Bosch Elektronika Kft autóelektronikai gyártó cég alkalmazza.

A **II. téziscsoport (III/a. és III/b. tézis)** eredményeit felhasználva bármilyen préselési technológia esetén a lamináció minősége kvantitatív úton minősíthető, mely módszert más préselési technológiákra is lehet alkalmazni. Továbbá a bemutatott roncsolásmentes vizsgálati módszer segítségével igazoltam, hogy a vizsgált LTCC rétegek közötti kötés a laminálási időtől nem függ jelentősen, ellenben a préselő nyomástól igen, amely értékének helyes megválasztásával elkerülhetők a delaminációs jelenségek a geometriai méretek torzulása nélkül.

A **IV. tézis** eredményeit felhasználva a csatorna geometriájának torzulása meghatározható, figyelembe véve az áldozati anyag deformációját. A különböző szélességű csatornák torzulásának számításait felhasználva, már a tervezés fázisában vizsgálhatjuk az áldozati anyag alkalmazhatóságát, lehetővé téve az optimális áldozati anyag típusának (por vagy szilárd anyag) megválasztását.

A **V. tézisben** a keményítő, mint áldozati anyag bomlásának vizsgálatára termikus analitikai módszereket használtam. Megfelelő matematikai modellel felbontottam a termogravimetriás mérések során nyert DTG görbéket adott szukcesszív folyamat részgörbéire. A modell alkalmazhatóságát, az anyag kinetikai viselkedését részletesen vizsgáltam érvényességét validáltam. Ezek alapján a keményítő bomlásának korlátozására az LTCC-hez alkalmazott hőprofil módosítottam egy további lassítási szakasz beiktatásával, így a gázképződés legintenzívebb szakaszát elnyújtottam, de a profil további részét feleslegesen nem lassítottam.

Publikációk listája

Tézispontokhoz kapcsolódó publikációk

Lektorált, idegen nyelvű, külföldön megjelent folyóiratcikk

- [L1] **E. Horváth**, G. Hénap, Á. Török, G. Harsányi: „Mechanical Modelling and Life Cycle Optimisation of Screen Printing”, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, vol 50, no. 4, 2012, IF 0.264
- [L2] **E. Horvath**, G. Henap, G. Harsanyi: Materials and Technological Development of Screen Printing in Transportation; International Journal for Traffic and Transport Engineering, vol. 2, no. 2, 2012, 133-141 o.
- [L3] **E. Horváth**, A. Török, G. Harsányi: „Design And Application Of Low Temperature Co-Fired Ceramic Substrates For Sensors In Road Vehicles”, (in press) Transport, IF2.552
- [L4] **E. Horváth**, G. Hénap, G. Harsányi: „Finite Element Modeling of Channel Sag in LTCC”, Microelectronics International, Vol. 29, Iss. 23. 145-152 o. IF 0.468
- [L5] **E. Horváth**, G. Hénap, A. Torok, G. Harsányi: „Mechanical characterization of glass-ceramics substrate with embedded microstructure” Journ of Mat Sc-Materials in Electronics, vol. 23, i. 12, 2012, 2123-2129 o., IF 0.927
- [L6] **E. Horváth**: Thermal analysis of starch for realizing embedded channel in low temperature co-fired ceramic, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry (közlésre beküldve) IF 1,604
- [L7] **E. Horvath**; P. Ficzer; G. Henap; A. Torok; G. Harsanyi: Optimisation of computer aided screen printing design, Journal of Computer-Aided Design (közlésre beküldve) IF 1.542

Lektorált, idegen nyelvű, Magyarországon megjelent folyóiratcikk

- [L8] **E. Horváth**, G. Harsányi: „Optimization of Fluidic Microchannel Manufacturing Processes in Low Temperature Co-Fired Ceramic Substrates”, *Periodica Polytechnica- Electrical Engineering*, 54/1-2, 2010, 79–86 o.

Referált, idegen nyelvű, nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent előadás

- [R1] **E. Horváth**, G. Harsányi: “Modeling and Simulating Lamination of LTCC Substrate Containing Embedded Channel”, *34rd International Spring Seminar on Electronics Technology, IEEE-ISSE2011*, Tatranská Lomnica, Szlovákia, 2011.05.11-2010.05.15. 409 - 413. o.

Idegen nyelvű, nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent előadás

- [K1] **E. Horváth**, G. Harsányi: “Realizing Fluidic Microchannel In Low Temperature Co-Fired Ceramic Substrate”, *Electronic Devices and Systems IMAPS CS International Conference Proceedings*, Brno, Csehország, 2009, 227-234. o.

Egyéb publikációk

Lektorált, idegen nyelvű, Magyarországon megjelent folyóiratcikk

- [L9] **E. Horváth**: „Embedded Thick-Film Resistors Applied in Low Temperature Co-fired Ceramic Circuit Substrates”, *Periodica Polytechnica-Electrical Engineering*, 2008, Vol. 52, Issue 1-2, 45-57. o.

Referált, idegen nyelvű, nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent előadás

- [R1] **E. Horváth**, A. Erényi, A. Géczy, and G. Harsányi: “ Optimization of breaking processes in LTCC manufacturing”, *17th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging , IEEE-SITME2011 Conference Proceedings*, Timisoara, Romania, 2011, 409 - 413. o.

Nem lektorált, magyar nyelvű, Magyarországon megjelent folyóiratcikk

- [M1] **Horváth E.**: „Build up technológia és a zsákfuratok fémezésének vizsgálata” I. rész, *Elektronet*, 2008, XVII:(6) 57-58. o.
- [M1] **Horváth E.**: „Build up technológia és a zsákfuratok fémezésének vizsgálata” II. rész, *Elektronet*, 2008, XVII:(7) 52-53. o.
- [M3] **Horváth E.**: „Az üveg-kerámia hordozók technológiai problémái”, *Elektronet*, 2009 XVIII: 31-33. o.

Hivatkozott irodalom

- [1] D.R. Kobs and D.R. Voigt, Parametric dependencies in thick film screening. *Proc. ISHM* 18, 1970, 1–10 o.
- [2] L. F. Miller, Paste Transfer in the Screening Process, *Solid State Technology*, 1969, 46–52 o.
- [3] Dietrich E. Riemer, Analytical model of the screen printing process: part 2. *Solid State Technology* 9, 1988, 85–90 o.
- [4] Karol Malecha, Leszek J. Golonka Three-dimensional structuration of zero-shrinkage LTCC ceramics for microfluidic applications *Microelectronics Reliability* 2009;49: 585–591 o.
- [5] L.E. Khoong, Y.M. Tan and Y.C. Lam, "Study of deformation and porosity evolution of low temperature co-fired ceramic for embedded structures fabrication ", *Journal of the European Ceramic Society*, 2008, **29**, no. 13. 2737-2745 o.
- [6] Dominik Jurkow, Henryk Roguszczyk, Leszek Golonka: "Cold chemical lamination of ceramic green tapes" *Journal of the European Ceramic Society* 2009 29:703–709 o.
- [7] Karol Malecha, Leszek J. Golonka: "Microchannel fabrication process in LTCC ceramics" *Microelectronics Reliability* 2008, 48, 866–871 o.
- [8] Espinoza-Vallejos, P., Zhong, J.-H., Gongora-Rubio, M. R., Sola-laguna, L. and Santiago-Aviles, J. J., "Meso (Intermediate)-scale electromechanical systems for the measurement and control of sagging in LTCC structures" *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 1998, 518, 3–79.
- [9] K. Kawakita, K., I. Hattori, M. Kishigami. *J. Powder Bulk Solids Technol.* 1, 1977, 3-8 o.
- [10] Heckel, R. W. Density pressure relationships in powder compaction. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 1961, 221, 671-675 o.
- [11] N.A. Armstrong and R.F. Haines-Nutt: „Elastic recovery and surface area changes in compacted powder systems”, *Powder Technology*, Vol. 9, Issues 5-6, May-June 1974, 287-290 o.
- [12] Jenike, A. W.: "Storage and Flow of Solids" *Utah Engineers Experimental Station, Bulletin 23*, University of Utah, 1964.
- [13] Irgens Fridtjov, *Continuum Mechanics*, Springer, Berlin, 2008

Köszönetnyilvánítás

Elsőként szeretnék köszönetet mondani *Dr. Harsányi Gábornak*, aki témavezetőként irányította és pártfogolta munkámat, tanszékvezetőként biztosította a kutatásaimhoz szükséges háttérrel.

Köszönet illeti *Dr. Jakab László* egyetemi docenst, aki támogatta a kutatáshoz szükséges háttérrel a Bosch-nál.

Köszönöm *Szabó András* (Robert Bosch Elektronika kft.) segítségét, aki lehetőséget biztosított kutatásaim elvégzéséhez.

Köszönettel tartozom *Dr. Török Ádámnak*, mind szakmailag, mind emberileg támogatta a kutatómunkámat.

Szeretném megköszönni *Hénap Gábor* doktorandusz (BME-MM) tevékeny segítségét a szimulációs eredmények kinyerésében és grafikus megjelenítésében.