

Feszültségek és deformációk a zománcozott épületlemezeken.

Filip Abeele, Eric Hoferlin, Marc Leveaux; Arcelor Mittal Research Industry Gent, Belgium

Philippe Gousselot; Universitát Gent, Belgium

Michel Vermeulen; Arcelor Mittal Product Development Florange, Florange, France

(EMAIL-Mitteilungen, 2010.04)

(Fordította: Dr Való Magdolna)

Rövid ismertetés

Egy zománcozott ac llemmez égetés utáni leh l se alatt feszültségek lépnek fel az olvadék és az acél hőtágulása közötti különbségek miatt. Ezek a hőterhelések a zománcozott munkadarab elhúzódásához, felp posod s hoz vezethetnek. Különösen a s k, vékony építészeti lemezek hajlamosak erre a problémára.

Ez az előadás egy kísérleti design eredményeit (statisztikus kísérleti terv) mutatja be a geometriai forma, a zománc rétegvastagsága és a gyártási feltételek befolyásának vizsgálatát illetően.

A vékony ac lt bla termikus deform l d s nak és meghajlásának elméleti hátterét írjuk le, és kifejlesztett k a véges elemek modelljét a komplett égetési ciklus szimulálására. Végül néhány design  r nyvonalat vezet nk le, hogy a zománcozott ac lt bla termikus deformálódását és felp posod s t elker lhess k, de legalább cs kkenthes k.

1. Bevezetés

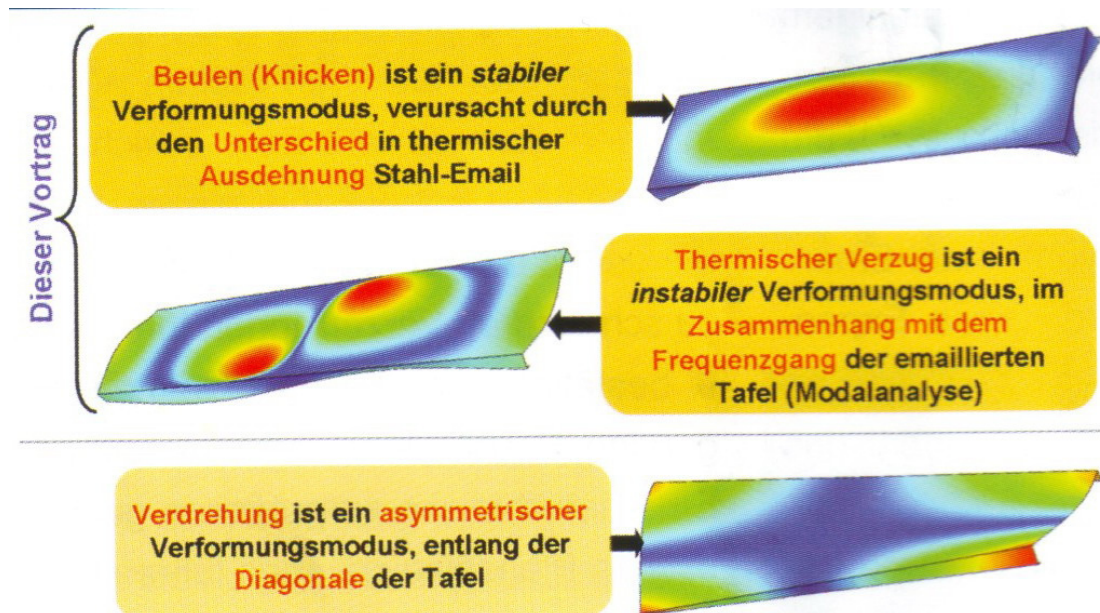
Ebben a közleményben egy kombinált kísérleti és számszerű magy razatot k s r nk figyelemmel, hogy a zománcozott táblákon a termikus deformálódást és a felpúposodást kikutassuk, ahogy azok az építészeti felhasználásnál jelentkeznek.

- Először megvizsgáltuk egy széleskörű kísérleti designen a geometria, a zománcvastagság és a gyártási feltételek befolyását. A legjelentősebb megfigyeléseket a következő fejezetben foglaltuk össze, ezek értékes információk kincstárát képezik a zománcozott építészeti táblák viselkedésének.
- A továbbiakban a vékony ac lt bl k elhúzódásának és behorpad s nak elméleti hátterét írjuk le. A termikus behorpadás egy stabil deformációs mód, amit az acél és a zománc hőtágulási különbsége okoz. Az alakváltozásnak ez a m dj  (amit teljesen nem lehet elkerülni) leírható a bimetall termosztát elmélettel. A termikus elhúzódás egy instabil deformáció, ami szoros összefüggésben van a tábla frekvencia g rb j vel.

Ezt az összefüggést a geometriai tulajdonság, a saját feszültség vagy a kritikus nyomófeszültség okozza.

- Végül elvégeztük a teljes égetési ciklus véges elemek szimulációit, hogy a termikus deformációt és a felpúposodást megjósoljuk. A tulajdonképpeni égetési feltételeket (mint láncsebesség és hőmérséklet) és a gravitációs terhelést figyelembe vettük, hogy a felakasztás befolyását vizsgálhassuk. A megjósolt termikus deformáció a kísérlettel jól egyezett.
- A számszerű szimuláció eredményével végül néhány segítő intézkedést javasoltunk a nem kívánatos deformáció elkerülésére úgy, hogy ezek a zománcozott építészeti táblák számára irányvonalnak tekinthetők.

Fontos, először a különböző deformációk, amelyek a zománcozott lemezeknél megfigyelhetők, megkülönböztetése és pontos definiálása, valamint az ehhez tartozó geometria ábrázolása. Erre vonatkozik az **1. ábra**. Eközben szimulálhatjuk a tábla csavarodását is. Ezzel ebben az előadásban nem foglalkozunk, mivel az építészeti elemeket az épület falára szerelik úgy, hogy ez az alakváltozás nem okoz problémát.

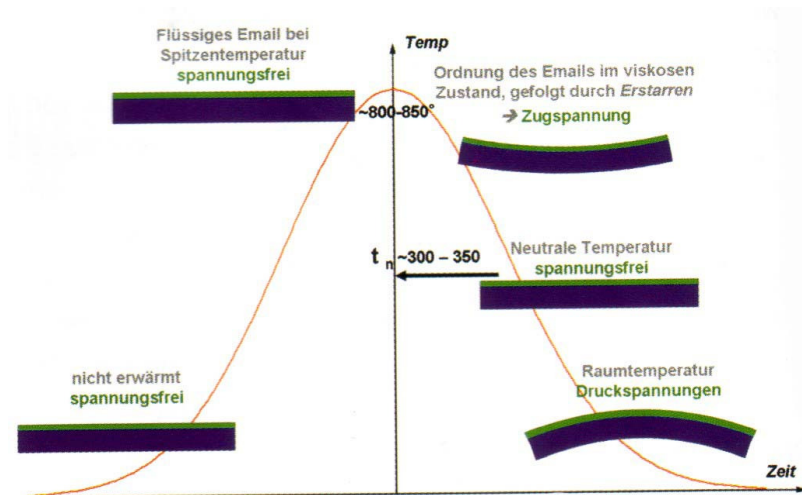


1. ábra
Lehetséges deformáció módosulatok

A zománcozási folyamat – a zománc felvitele és beégetése, de különösen a befejező lehűtés – a különböző rétegekben feszültségekhez vezet, ami a tágulási különbségek

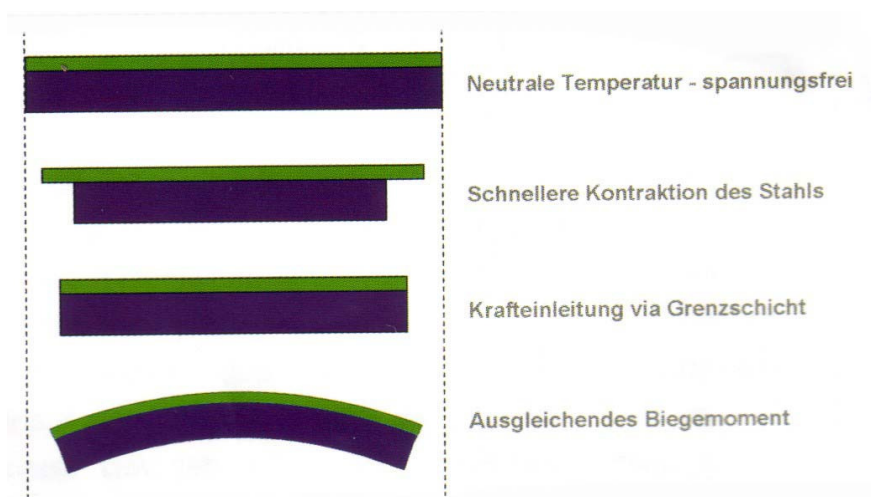
miatt az acél-zománc rendszerben geometriai deformációhoz vezet. Ezt a viselkedést mutatja be a **2. ábra**.

Itt ismeretes a semleges hőmérséklet fogalma. A zománc és az acéllemez táglási együtthatója különböző módon függ a hőmérséklettől, a semleges hőmérséklet az a hőmérséklet, amelynél a zománc és az acél táglása kiegyenlítődik.



2. ábra
Feszültségek keletkezése az acél/zománc rendszerben.

Ez a semleges hőmérséklet a szokásos acél/zománc rendszerben 300-350°C-nál van, ami a zománczott lemez szobahőmérsékletre való lehűlésénél konvex deformációhoz vezet.



3. ábra
Acél/zománc közötti feszültség keletkezése semleges hőmérséklet alatt

2. Statisztikus kísérleti terv (Design of Experiments)

Átfogó kísérleti tervet készítettünk (4. ábra) az építészeti lemezek termikus deformációjának eredeti nagyságban való vizsgálatára, kísérleti adatokat állítottunk össze a számszerű szimulálás pontosságának megbecsülhetőségére.

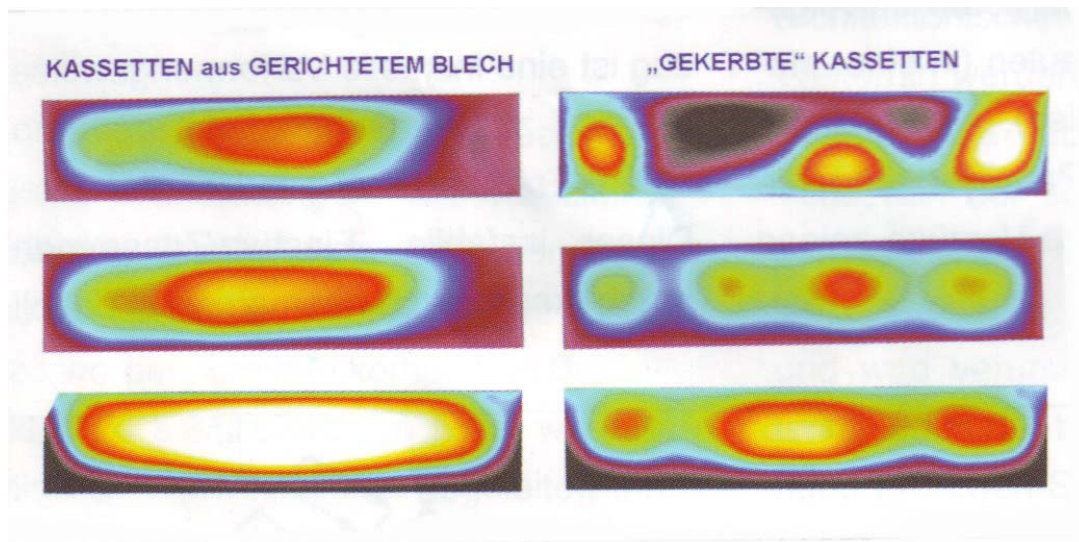


4. ábra
Építészeti lemezek zománcozása

A tábla geometriájának, a zománc vastagságának, az égetés körülményeinek és az égetési ciklus számának befolyását vizsgáltuk. Minden tábla geometriáját a zománcozás előtt és után optikai letapogató rendszerrel mértük, hogy a termikus deformáció mértékét meghatározhassuk, amelyet az acél/zománc rendszer idéz elő. Ezek a kísérletek a zománcozott építészeti lemezek viselkedéséről a nagyon értékes információk egész kincstárát nyújtották.

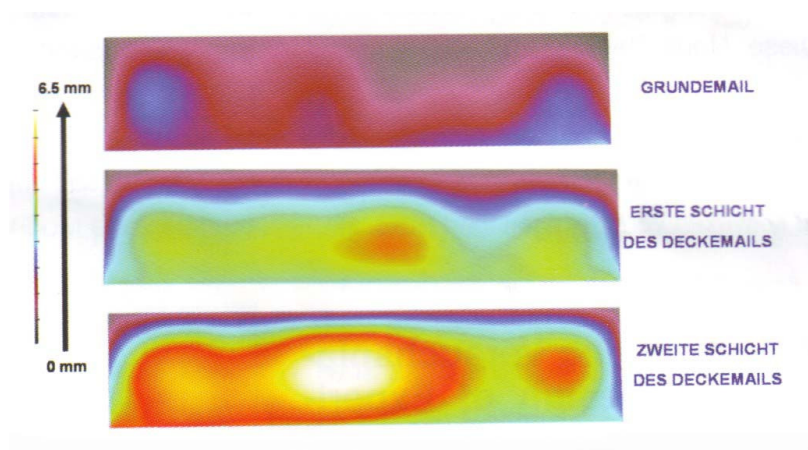
A leginkább figyelemre méltó észrevételeket röviden ismertetjük. Minden lemezt zománcozás előtt kiegyengettünk. Néhány lemezt utána szándékosan berecéztünk, hogy az acéllemez eredeti egyenetlenségének befolyását értékelni lehessen. Bár a felületi simaság különbségét az egyengetett és a berecézett között zománcozás előtt nem lehetett észlelni, zománcozás után világosan észrevehető volt. (lásd 5. ábra)

Az egyengetett lemezből készült táblák zománcozás után általában enyhe görbületet mutattak, míg a nem egyengetett lemezből készült táblák optikailag sokkal rosszabb deformációhoz vezettek.



5. ábra
Reális kísérletek építészeti lemezeken. Egyengetés befolyása
 egyengetett lemez „recézett” lemez

A zománcréteg úgy működik, mint a termikus deformáció „okozója”. Vastagabb zománcréteg nagyobb termikus feszültséget okoz az acél/zománc táblán, ami nagyobb deformációhoz vezet. A **6. ábra** bizonyítja, hogy az egymást követő égetési ciklusok a növekvő zománcvastagsággal nagyobb geometriai elhajláshoz vezetnek.



6. ábra
Beégetési ciklusok befolyása

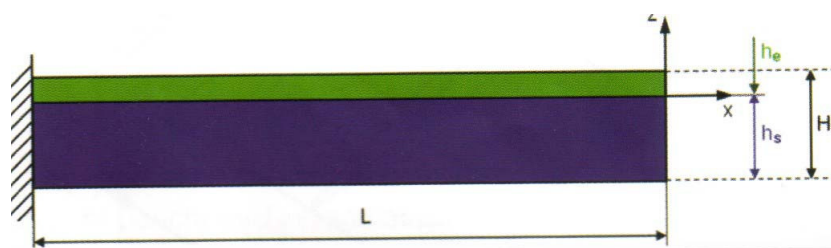
3. A termikus hullámosság és a deformáció modellezése.

Ebben a részben a vékony acél-zománc lemezek felpúposodásának és deformációjának elméleti hátterét mutatjuk be. A termikus horpadás egy stabil deformációs mód – az acél és a zománc különböző hőtágulása miatt. A deformációnak ezt a típusát – amely teljesen soha nem kerülhető el – a bimetall-termosztat elmélettel lehet leírni. A

termikus elhúzóadás egy instabil alakváltozási mód, amely szorosan összefügg a tábla frekvencia karakterisztikájával. Ezt az instabil „bedőlés/összeroskadást” a geometriai tökéletlenség, maradékfeszültség vagy kritikus nyomó igénybevétel által lehet működésbe hozni, és a bifurkáció elmélettel lehet előre megmondani.

3.1 A bimetall elmélet és a hullámosság.

1925-ben hozta nyilvánosságra Timoshenko a bimetall szalag felmelegedés általi elhajlásának általános elméletét, a termosztát funkciójának analizálásához. Jóllehet akkor ő elfogadta, hogy a hőtágulási együttható különbsége a felmelegedés alatt nem változik, mégis alkalmazni lehet ezt az elméletet egy acél/zománc rendszernek a T_n neutrál hőmérsékletre T véghőmérsékletre (mint szobahőmérsékletre) való lehűlés termikus eltéréseinek számítására. (7. ábra) A számításhoz az anyag adatait alkalmazták, amelyek szokásosak a klasszikus zománc-acél rendszerek esetén. (1. táblázat)

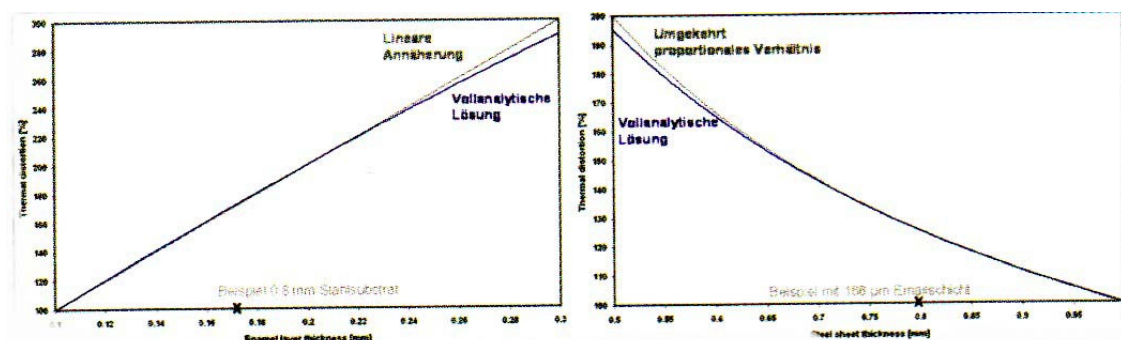


7. ábra
Timoshenko bimetall elmélete (analitikai megoldás)

	jel	egység	acél	Zománc
lemezvastagság/zománcvastagság	h	(mm)	1,5	0,4
elaszticitási modul	E	(GPa)	210	85
tágulási együttható	α	($10^{-6}/K$)	12,0	8.0
folyáshatár	R_e	(MPa)	193	-
szakítószilárdság	R_m	(MPa)	315	~0,0
neutrálhőmérséklet	T_n	$^{\circ}C$	350	
szobahőmérséklet	T	$^{\circ}C$	20	

1. táblázat
Tipikus acél/zománc rendszer fizikai tulajdonságai

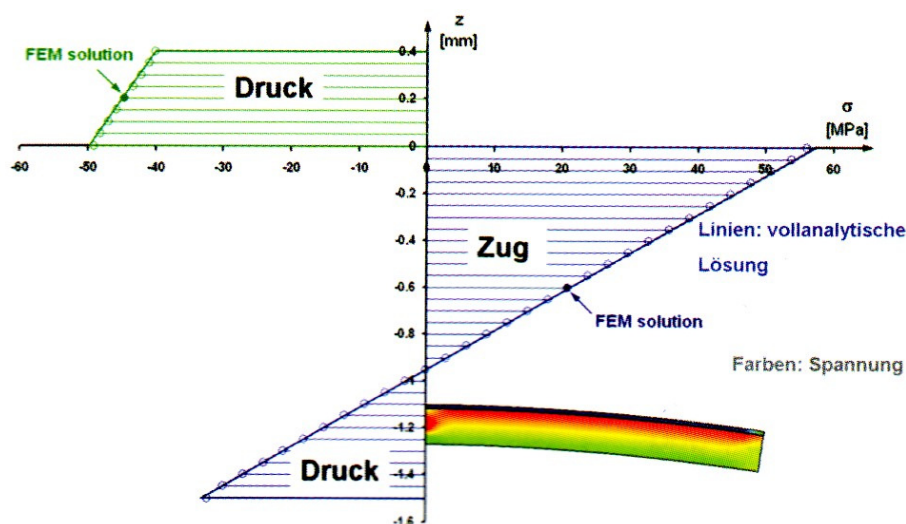
Ezzel a módszerrel számítani lehet a legfontosabb befolyásoló tényezőket. A zománcreteg vastagsága azonos lemezvastagságnál valóban közel lineárisan növeli az alakváltozást, mivel a lemezvastagság növekedése érthető csökkenést okoz (8. ábra)



8. ábra

A zománc (balra) és a lemezvastagság befolyása a bimetallnál (jobbra)

Timoshenko klasszikus megoldásával párhuzamosan végrehajtottuk a véges elemek analízisét („Finite-Elemente” analízist, a továbbiakban FEM) Mindkét eljárás összehasonlítását mutatja a 9. ábra.



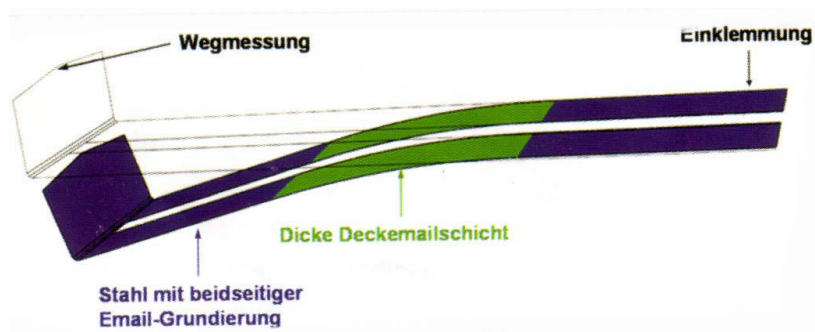
9. ábra

Bimetal összehasonlítás, FEM és analitikai megoldás

Itt felismerhető, hogy a feszültség eloszlása az acél/zománc rendszeren nagyon jó, azaz majdnem tökéletesen egyezik. A következő lépés a Klotz-teszt szerinti összehasonlítás. (lásd 10. ábra) A gyakran alkalmazott Klotz tesztet normálisan azért

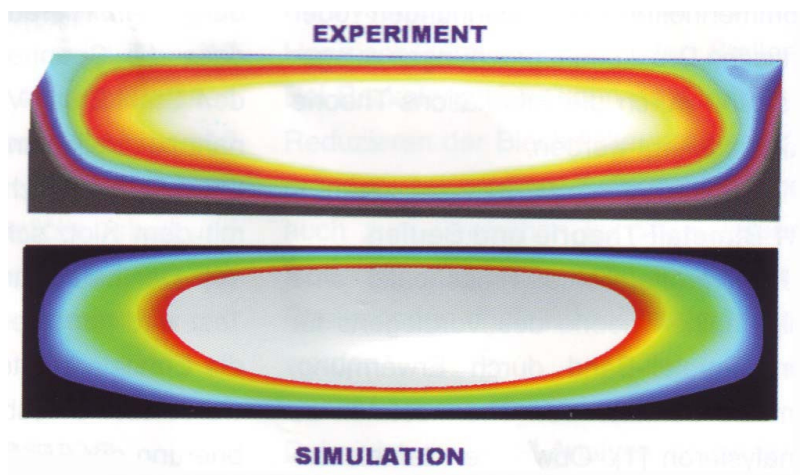
használják, hogy a zománc paramétereit meghatározzák, és itt pedig azért, hogy a FEM analízis kalibrálását még egyszer felülvizsgáljuk.

Timoshenko elmélete ezután teljessé tette a tágulási együtthatók hőmérséklettől való függőségének és a szalagból (2d) a lemeztáblához (3d) való átmenetnek a megfigyelését. A Klotz-féle teszt és a FEM eljárás közötti jó egyezés bizalmat nyújt arra, hogy a FEM eljárás a gyakorlatban jól alkalmazható. (11. ábra)



10. ábra

Klotz-teszt a zománc paraméterek meghatározásához és a FEM kalibrálásához.



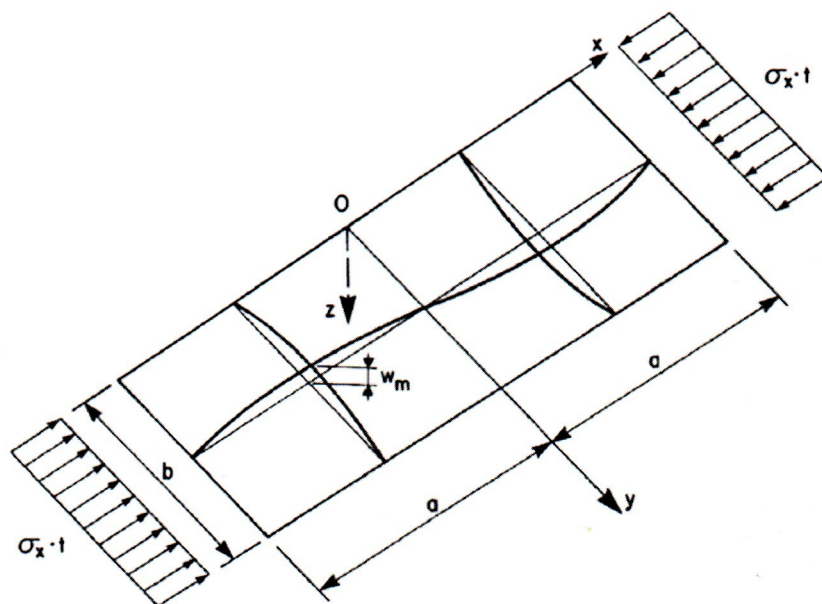
11. ábra

Építészeti lemez deformálódása: kísérlet és szimuláció összehasonlítása.

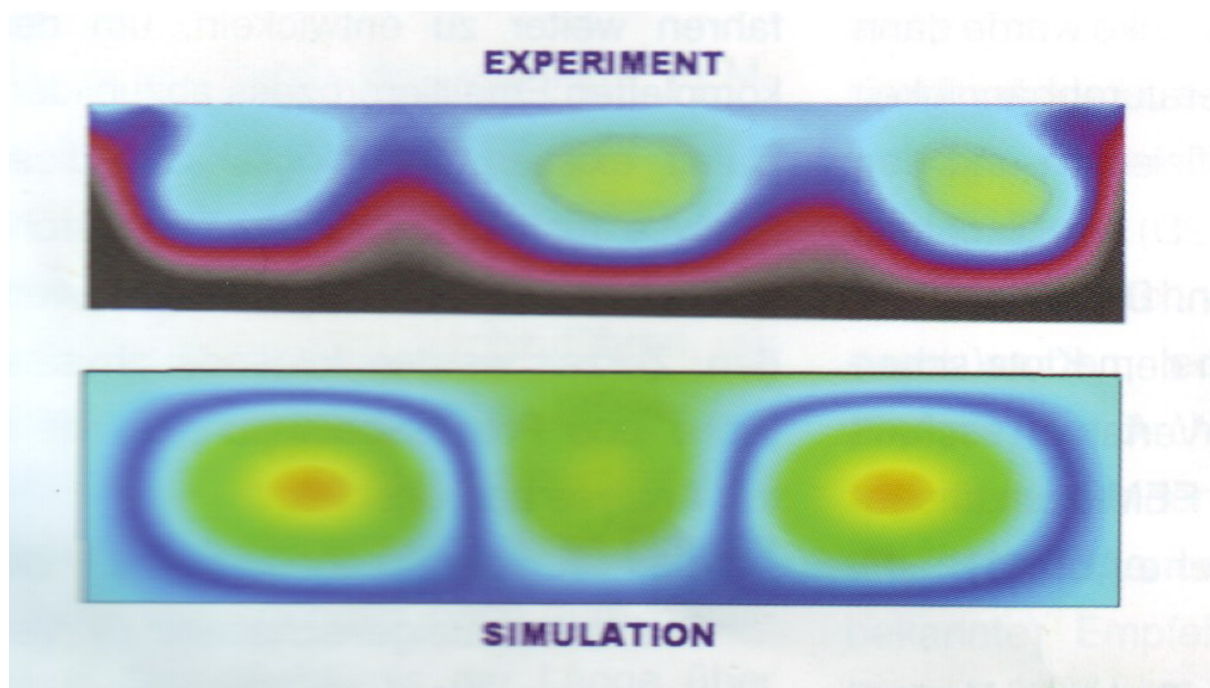
3.2 Instabil termikus vetemedés

A vékony acéllemez szélein történő nyomás alatti kritikus terhelésnek (lásd 12. ábra) analitikus számítása az elaszticitás klasszikus elméletén alapul és egy komplikált differenciál egyenlet megoldását követeli. Egy összehasonlító FEM analízist hajtottunk végre a FEM eljárásnak a deformációra vonatkozó kiértékelésére, és hogy a továbbiakban az általános gyakorlati geometriákra alkalmazni lehessen. Egy össze-

hasonlító számítás/kísérletet mutat be a **13. ábra** az építészeti lemezeknek erre a termikus vetemedésére.



12. ábra
Egy lemez instabil deformációja nyomó terhelésnél.



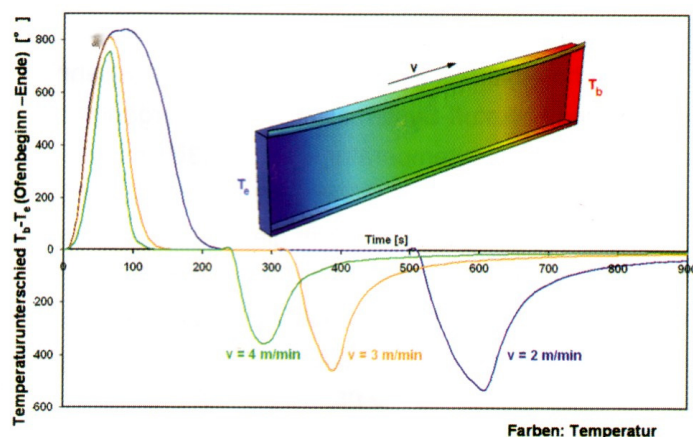
13. ábra
Termikus vetemedés a lemezeknél: kísérlet és szimuláció.

4. Komplet zománcozási folyamat FEM szimulációja

A FEM szimuláció eredményeiből nyert bizalom a fent említett „steady state” példánál, arra ösztönöztek minket, hogy a FEM eljárást tovább fejlesszük a teljes zománcozási folyamat ábrázolására. Ezzel lehetőség lesz arra, hogy ezt az analízist a valóságos méretű építészeti lemezek zománczásánál alkalmazzuk. Jelenleg az analízisben a következő fizikai körülményeket vesszük figyelembe:

- az acélalap tulajdonságainak függőségét a hőmérséklettől: (i) a Young modul csökkenése, (ii) a hőtágulási együttható alakulása, (iii) az elasztikus-plasztikus viselkedés magasabb hőmérsékleten,
- a különböző zománcrétegek tulajdonságai a hőmérséklet függvényében,
- az égetőkemence beégetési körülményei: pl. a hőmérséklet profil és a lán sebesség,
- az építészeti lemez geometriája és a design,
- a gravitáció és a különböző lehetőségek a láncra akasztásnál,
- a termikus feszültségek (és a megfelelő deformációk) keletkezése az acél-zománc kapcsolatban.

A **14. ábra** mutat egy példát a lán sebesség hatásának vizsgálatára. Itt kiszámoltuk egy lemez kezdete és vége közötti hőmérséklet különbséget, három különböző lán sebesség esetén. Ebből a képből megismerhető, hogy a zománc homogenitása számára legjobb a lehető legnagyobb sebesség. Ehhez mindenesetre egy hosszú kemence lenne szükséges, hogy garantálni lehessen egy tökéletes beégetést. A gyakorlatban természetesen adott a kemence hosszúsága és ezzel korlátozott a lán sebesség.

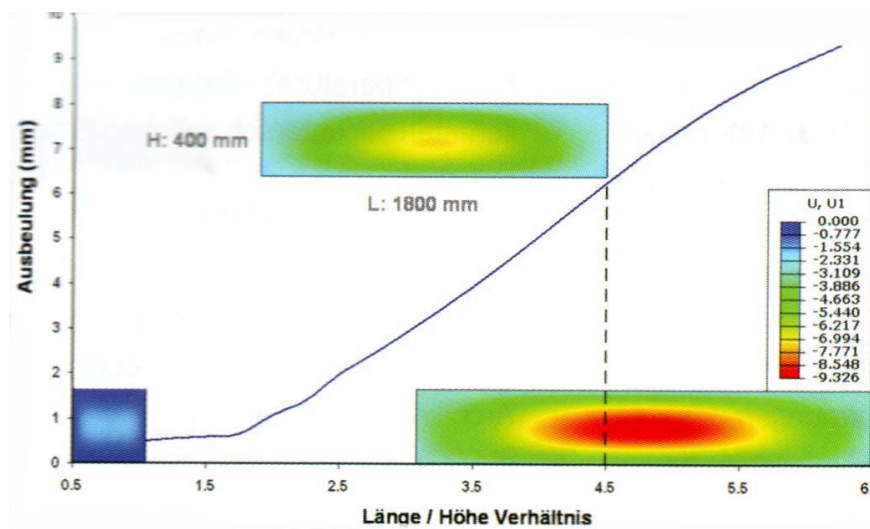


14. ábra

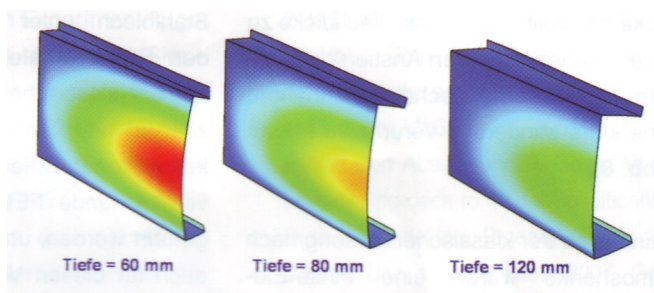
A teljes folyamat FEM szimulációja: a lán sebesség befolyása.

5. Intézkedések a termikus deformáció csökkentésére építészeti lemezek zománcozásánál

Az itt bemutatott, validált FEM modell megengedi azoknak a paramétereknek vizsgálatát, amelyek befolyásolják a termikus felpúposodást és a deformációt, és ezzel érzékenységi analízis végrehajtását, hogy a nem kívánatos hatásokat redukálni lehessen. Példaként a felakasztás módja nyilvánvalóan hatással van a deformációra. A panel hosszának és szélességének aránya egy még fontosabb paraméter. A **15. ábra** világosan mutatja ennek hatását. Konstans magasság mellett három panel hosszúsággal számoltunk: e szerint a négyzetes forma vezet a legkisebb deformációhoz. A perem mélysége is befolyással van, anélkül, hogy gyakorlati próbákat kellene véghezvinni. (**16. ábra**)

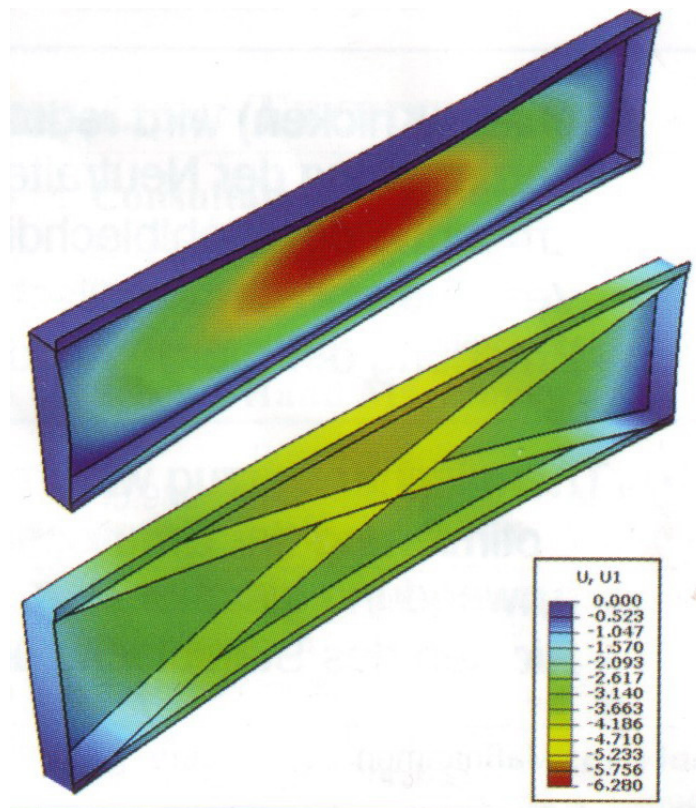


15. ábra
Hosszúság/szélesség arányának befolyása építészeti panelnél.



16. ábra
Befolyásoló paraméterek: a peremmélység korlátozza a deformációt

Természetesen a komplett design változások hatását meg kell vizsgálni mielőtt új termék gyártását kezdenék el. A **17. ábra** példaként bemutatja a behegesztett átlós megerősítést, amely a várákozásnak megfelelően csökkenti a deformációt, mindenestre ez egy pótmunka, amely költséget jelent, és jó hegesztést követel.



17. ábra
Átlós megerősítés

6. Összefoglalás

A FEM szimuláció, amelyet kifejlesztettünk és laboratóriumi valamint gyakorlati kísérletekkel bizonyítottunk, most lehetővé tesz költséges geometriákat valóságos nagyságban vizsgálni és optimalizálni. Ezeket természetesen esetről-esetre meg kell vizsgálni, mégis az építészeti lemezek jövőbeni analízise már általános tendenciákat állapít meg, hogy azokból általános (részben már ismert) ajánlásokat ismertethessünk. Ezek összefoglalását ábrázolja a **18. ábra**

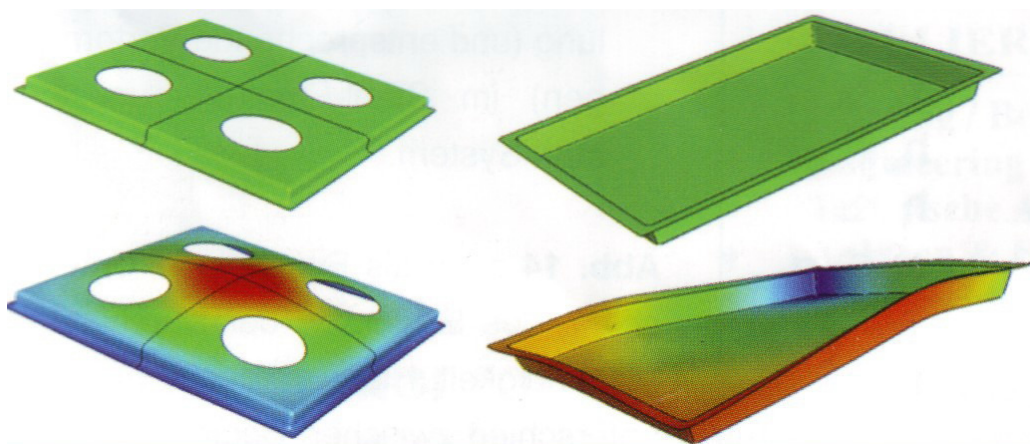
Mivel az említett termikus deformációk a kísérletekkel jól egyeznek, a mi szimulációs kompetenciánkkal döntő értéktöbbletet lehet elérni a „Customer Technical Support”-ban nem csak az építészeti lemezeknél, de más felhasználásoknál is, mint pl. sütőkamra, bojler, stb. Tudvalevően ezeknél is felléphet a semleges hőmérséklet feletti hőmérséklet (pl. a pirolitikus folyamatnál) a hajszálrepedés veszélyével meghatáro-

zott helyeken. A sütőkamra lemezeknél a költségek miatti lemezvastagság csökkentése által felpúposodások és csavarodások léphetnek fel (lásd 19. ábra). Ezt aztán a design változtatása miatt ismét meg kell fizetni.

- A felpúposodás (horpadás) csökkenthető a következők által
 - a semleges hőmérséklet csökkentésével
 - az acéllemez vastagságának növelésével
 - a zománcvastagság csökkentésével
 - a zománc hőtágulási együtthatójának növelésével
- A termikus deformáció csökkenthető a következők által
 - a zománcvastagság optimalizálásával
 - a „modelanalízishez” hasonló paraméterek alkalmazásával
 - az acéllemez egyengetésével és „kíméletes kezeléssel”

18. ábra

Intézkedések a termikus deformációk csökkentésére acél/zománc rendszerénél



19. ábra

Sütőkamra részek: felpúposodás (balra) és csavarodás (jobbra)

Ezért a FEM analízis különösen hasznos, mivel a különböző változtatási javaslatokat előre meg lehet vizsgálni, és össze lehet hasonlítani, ezzel a drága szerszámalakítási költségek elkerülhetők.