

MISKOLCI EGYETEM

Anyag-és Kohómérnöki Kar Doktori Tanácsa

Ph.D. értekezés

Hőkezelő harangkemencék falazatkorszerűsítése

Gárdus Zoltán

okl. automatizálási üzemmérnök, okl. kohómérnök

A Műszaki Tudományág **Metallurgia** c. doktori program,
Anyagtechnológiákbeli energiafelhasználás alprogramja

Programvezető: **Dr. Farkas Ottó** DSc, egyetemi tanár
Dr. Voith Márton DSc, egyetemi tanár
Dr. Károly Gyula DSc, egyetemi tanár

Alprogramvezető: **Dr. Bíró Attila** DSc, egyetemi tanár

Tudományos vezető: **Dr. Farkas Ottóné** Ph.D., egyetemi docens

Miskolc
2002. február

Borítólapp módosítás

MISKOLCI EGYETEM

**Kerpely Antal Anyagtudományok és technológiák
Anyag-és Kohómérnöki Kar Doktori Iskola Tanácsa**

Tüzeléstani Tanszék

Hőkezelő harangkemencék falazatkorszerűsítése

Gárdus Zoltán

okl. automatizálási üzemmérnök, okl. kohómérnök

Ph.D. értekezés

Anyagtudományok és technológiák tudományág

**Miskolc
2003. július**

Tartalomjegyzék

Hőkezelő harangkemencék falazatkorszerűsítése

1. A harangkemencék jelentősége az acélkohászati termékfejlesztésben	5
2. A harangkemencék fejlesztésének szakirodalmi áttekintése.....	8
3. A gáztüzelés vagy az elektromos fűtés dilemmája.....	12
4. A hőkezelés gazdasági vonzata.....	20
5. A hőkezelés hőtani alapjai.....	36
5.1. A kemencék bélésanyagának hőtani tulajdonságai.....	36
5.2. A harangkemencékben végbemenő hővezetés, konvekció és a hősugárzás jellemzése.....	39
5.3. A hővezetési tényező szerepe, meghatározásának számítógépes modellezése.....	44
5.4. Különböző falszerkezetű kemencék tűzálló bélésének számítógépes modellezése.....	51
5.5 A szimulációs eredmények összevetése a tényleges mérési eredményekkel, valamint a kivitelezésre vonatkozó legfontosabb jellemzők.....	63
5.6. Az optimális falvastagság meghatározása.....	70
6. Javaslatok a harangkemencék fejlesztésére.....	71
7. Véggövetkeztetések, tézisek.....	74
Irodalomjegyzék.....	89

Ajánlás **Gárdus Zoltán Ph.D.** értekezéséhez

Gárdus Zoltánt automatizálási üzemmérnökként, a Miskolci Egyetem Informatikai Intézetének tanszéki mérnökeként ismertem meg 1994-ben, amikor levelező hallgatóként kohómérnöki oklevél megszerzése érdekében tanult, tüzeléstan és kohászati kemencék témájú tantárgyakat, a Tüzeléstani Tanszéken. Kitűnt érdeklődésével, szorgalmával, precizitásával, jeles gyakorlati és vizsga jegyeivel.

Diplomaterv feladatát is a Tüzeléstani Tanszéktől kapta és irányításommal készítette el az elektromos ellenállás-fűtésű laboratóriumi hőkezelő kemence tervezése, építése, üzemeltetési tapasztalatainak megszerzése tárgyában. Dolgozatát az Állami Vizsgáztató Bizottság jeles érdemjeggyel minősítette. 1996-ban jó minősítéssel kohómérnöki oklevelet szerzett, a Miskolci Egyetemen.

Diplomaterv témájának eredményeit, közös konferencia előadásban ismertettük 1995-ben Miskolcon, a TŰZELÉSTECHNIKA „95” XXXI. Ipari Szemináriumán, **”Hőmegtakarítási, valamint kemence vezérlési és szabályozási eredményeink, egyedi tervezésű, elektromos ellenállás-fűtésű, laboratóriumi vákuum munkaterű hőkezelő kemencéknél”** címmel. Ennek a témának több részlete aktuális kemencetervezési, energia-megtakarítási gondolatot vetett fel.

A jelölt már 1993-ban tudományos pályájának a kezdetén, „Az információs rendszerek” kategóriájában, **”Automatikus adagolású fogtechnikai laborkemence grafikus megjelenítésű vezérlő és szabályozó szoftverrendszer”** és a hozzá tartozó kemencének a bemutatásával, a Miskolci Egyetemen megrendezett microCAD-SYSTEM Nemzetközi Számítástechnikai Találkozón, a II. helyezést érte el.

1998. szeptemberében doktorjelöltként felvételt nyert a ME akkori Kohómérnöki Karán akkreditált doktori programra, egyéni képzési formában. Ezóta tudományos vezetőjeként irányítom tudományos munkáját.

Az 1998/99-es tanévben, nagy szorgalommal - a napi nagy óraszámú oktatási és kutatási feladatainak ellátása mellett - feszített tempóban eleget tett a kitűzött vizsgakövetelményeknek. Nevezett tanévben 10 vizsgát abszolvált, ebből 9-et jelesre, 1-et pedig jóra.

Vizsgálataival 80 kreditpontot szerzett, további 40 pontot szakcikkei, konferencia előadásai, kutatói és oktatói munkája eredményezett.

Mindezek birtokában elnyert külön engedéllyel, 1999. július 5-én "*summa cum laude*" minősítéssel, három tantárgyból doktori szigorlatot tett és ezzel doktorandusi vizsgakötelezettségeinek eleget tett.

Ezt követően disszertációja és publikációinak készítésével foglalkozik. 2000. október 31-én dolgozata munkahelyi vitára lett bocsájtva, ahol a megjelent szakemberek elismeréssel fogadták munkáját. Ez idő alatt konferencia előadást tartott a TÜZELÉSTECHNIKA 2000 XXXVI. Ipari Szemináriumán Miskolcon, a Tudomány és Technika Házában „**Különböző falazatkonstrukciójú kemencebélésszerkezetek számítógépes szimulációja**” címmel. Aktívan vett részt a Miskolci Egyetemen 2001. 08. 13-19-e között megrendezett 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE OF Ph.D. STUDENTS „**WALL-MODELING OF INTERMITTENT-RUNNING FURNACES**” angol nyelvű cikke és előadása kapcsán. További eredményeinket ismertettük a Miskolci Egyetem Anyag-és Kohómérnöki Karának Tudományos Ülésszakán Miskolcon, amit a MAB Székházban 2001. 09. 11-12-e között rendeztek meg „**Szakaszos üzemű hőkezelő kemencék tűzálló falazatainak kialakítása számítógépes szimuláció segítségével**” témakörben.

2001. 09. 13-án a Miskolci Egyetem Idegennyelvi Oktatási Központjában, angol nyelvből a Ph.D. fokozathoz szükséges szakmai nyelvvizsgát letette.

Munkaköri oktatási feladatai jelenleg az Automatizálási Tanszéken, az automatika, digitális technika, digitális rendszerek és a hőenergia folyamatok szabályozástechnikája témájú tárgyakhoz kötődnek. Ezen belül az *Automatika* és a *Digitális rendszerek I-II.* című tárgyakat tantárgyjegyzőként gondozza, a graduális nappali képzésben kohómérnök hallgatókat oktat, valamint előadásokat és gyakorlatokat tart nappali és levelező főiskolai szintű villamosmérnök jelölt hallgatók részére.

Disszertációja témáját - előzetes kutatási tevékenységeire is alapozva - harangkemencék hőtani, tüzeléstani vizsgálata tárgyköréből választotta. Célkitűzése a legkisebb hőveszteséggel járó falazatszerkezet felderítése, tulajdonságainak meghatározása, számítógépes modellezése, a kapott szimulációs eredmények összevetése üzemi harangkemencék mért és számított adataival.

Mindezek birtokában, fejlesztési javaslatok, következtetések, konklúziók, tézisek megfogalmazásán dolgozik. Mindehhez üzemi tapasztalatokat gyűjtött a „Hámor Rt.” hőkezelő harangkemencéinél, melyek korszerűsítő felújításában tevőlegesen részt vett az 1998-1990. években.

Számítástechnikai, matematikai ismereteit jól alkalmazta a hőtani, tüzeléstani szakterületeken, disszertációja készítése során.

Kutatómunkájából szoftverek, egzakt számítási eredmények születtek, melyek alkalmazásával új módszereket, elméleti összefüggéseket vehet birtokába a szakma.

Gárdus Zoltán eddigi szakmai tevékenységével bebizonyította, hogy képes és alkalmas elmélyült kutatómunkára, új tudományos eredmények felderítésére, megalkotására és megfogalmazására.

A fentiek alapján javaslom a jelöltnek, a Ph.D. fokozat odaítélését.

Miskolc, 2002. február

Dr. Farkas Ottóné
egyetemi docens,
a műszaki tudomány kandidátusa, Ph.D., tudományos vezető

1. A harangkemencék jelentősége az acélkohászati termékfejlesztésben

A társadalom fejlettsége, jóléte szoros és összetett kapcsolatrendszerben áll az anyagtudománnyal, az anyagtechnológiákkal, valamint a felhasznált és alkalmazott anyagok minőségével. Erre a kölcsönhatásra jellemző, hogy a rendelkezésre álló anyagok jelentik termékeink előállításának alapfeltételét. Az egyre jobb minőségű és tulajdonságú anyagok iránti igény, döntő mértékben serkenti az anyag-előállítási technológiák egyre magasabb szintű kidolgozását, megvalósítását.

Vizsgálatom a kohászati üzemekben működő hőkezelő harangkemencék alkalmazására, a hőszigetelő falazatok kialakítására, valamint megoldási kérdéseinek az elemzésére, ill. a fűtési alternatívák megválaszolására irányul.

Ezek a harangkemencék a fémek, főképpen az acélok hőkezelésére, szolgálnak. A hőkezelendő betét anyag: **tekercselt áruk, szalagok, huzalok, kovácsolt vasúti kerékbroncsok**. Az alkalmazott maximális hőmérséklet-tartomány $\sim 1000\text{...}1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2, 13].

Fűtés szempontjából, a harangkemencék lehetnek gáztüzelésűek, vagy villamos ellenállás-fűtésűek. Az elektromos fűtésű kemencék előnyei a fosszilis tüzelőanyaggal fűtött kemencékkel szemben az, hogy:

- **kisebb a revésedés és a fémozidáció mértéke, mivel a hőkezelés mentes a füstgázatmoszféra okozta káros hatásaitól, a hőkezelendő termék minőségében negatív hatást, nagyrésztben a levegő jelenléte okoz;**
- **nincs füstgázvesztés;**
- **nagy tisztaságú, jó minőségű fémek, szerkezeti anyagok, állíthatók elő bennük, a hőkezelés okozta anyagtulajdonságok megváltozásával;**
- **nagy pontossággal betartható, a megfelelő szabályozási algoritmusok alkalmazásával, a munkatér-hőmérséklet és a szakaszos üzemmenet esetén az adott hőkezelési jelleggörbe.**

Villamos ellenállás-fűtésű kemencék esetében a fűtőszálakban folyó áram *Joule*-hőjét hasznosítjuk. Adott ellenálláson fejlődő hő:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t, \text{ Wh};$$

az elektrotechnikából jól ismert összefüggéssel számítható [2]:

[I]:áramerősség, A;

[R]:ellenállás, Ω ;

[t]:idő, h.

Fűtőellenállásként olyan anyagokat használnak, melyek hőállósága nagy, hővezető képességük pedig kicsi. Ilyen típusú ismert ellenállás-anyagok a KANTHAL ötvözetek. Ezek lehetnek téglalap vagy kör szelvényűek. Alkalmazásukat a tervezés fázisában, a KANTHAL méretezési segédletei és a gyártmányismertetői könnyítik meg [7, 41].

A betét hőkezelési jelleggörbéjének kialakításakor, az anyagszerkezeti átalakulásokra vonatkozó hőmérsékleti hatásokat nagy pontossággal meg kell határoznunk, az optimális technológia elérése érdekében. Anyagszerkezeti és technológiai szempontból nézve, matematikailag optimalizált célfüggvényeket kell kialakítanunk, amely megalapozott fémtani ismereteket igényel. Ha ezek az ismeretek megbízhatóak, akkor feltételezhetjük azt, hogy a hőkezelési technológiánk reprodukálható, amit számítógépes szimulációval, modellezéssel előre meg tudunk határozni.

A modellezésről akkor sem kell lemondanunk, ha bizonyos elemi empirikus ismeretekre támaszkodnak, mivel érvényességi határaik helyesen írhatják le a folyamatot.

Mindenképpen célszerű a folyamatot számítógéppel automatizálni, a matematikailag optimalizált célfüggvényeknek megfelelően. A futó szoftverek helyes működését ellenőriznünk kell, majd az esetleges hibákat korrigálnunk.

A fém termékek tulajdonságait alapvetően kémiai összetételük, szövetszerkezetük, szemcsenagyságuk határozza meg. A szemcsenagyság változtatásával, ugyanazon összetételű anyagokon belül, igen tág mechanikai tulajdonságok érhetők el. A tulajdonságok változási trendje sokszor ellentétes tulajdonságú. Példaképpen a szilárdsági

jellemzők javulásával a szívóssági jellemzők általában romlanak. Az anyagszerkezeti tulajdonság változása és a hőmérsékleti hatások együttes kölcsönhatásának megfelelő kombinációjával, kialakítható a közelítőleg optimális technológia.

A korszerű automatizált harangkemencék feladata az, hogy a fent említett alapelvek betartásával optimális hőkezelést lehessen velük megvalósítani [3, 4, 5, 14, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 38, 47, 53, 57, 66, 68].

2. A harangkemencék fejlesztésének szakirodalmi áttekintése

A kohászati technológia fejlődésének első lépcsőjében megjelenő harangkemencék, az angol szakirodalmi megnevezésben *bell-type furnace* néven, a hőkezelő kemencék csoportjába tartoznak. Falazatuk régebben egy un. munkabélésből és egy kisebb tömegsűrűségű hőszigetelő anyagkombinációból készült, ami általában az üzemi hőmérséklethez alkalmazkodó samott, ill. thermolit rétegekből állt.

Az alkalmazott maximális hőmérsékleti határérték ~ 1300 °C. Fűtési alternatívaként gáztüzelést, vagy villamos ellenállás-fűtést alkalmaznak, attól függően, hogy milyen kemenceatmoszférára van szükség, az adott feladat ellátásához. A gázégőket az igénynek megfelelően tangenciálisan vagy sugárirányban helyezik el, a kemence harang alsó harmadában (2. ábra), az intenzív füstgáz áramlási viszonyok elérése érdekében. Villamos fűtés esetén, a KANTHAL ellenállás-huzalból készült fűtőszálakat, a homogénebb térhőmérséklet biztosításának céljából, függőleges irányban több sorban helyezik el. Teljesítményüket soronként lehet és kell változtatni [7, 41].

Gáztüzelés esetén, a gáz-levegő szerelvények a harang palástján helyezkednek el, csatlakozási pontjaik régebben flexibilisek voltak, ma már fix helyzetűek. A fűtőharang kemencealapra történő ráhelyezésekor, csatlakoztatják a harang körvezetékeit a gáz és az égési levegőt ellátó rendszer megfelelő pontjaira.

Hasonló a megoldás villamos fűtés esetén is, csak ott a soronkénti villamos oldal betáplálását kell csatlakoztatni, az elektromos tápellátó rendszerhez.

A leendő betét rendszerint *tekerceselt áruk, szalagok, huzalok, vagy kovácsolt vasúti kerékabroncsok*.

A kemencéket rendszerint csoportosan telepítik, több kemencealappal, mivel a hűlő, hőkezelt betétről áteszik a harangot, a már előkészített új hőkezelendő rakományra.

Külső palástjuk, kemencepáncélzatuk, megfelelő mechanikai stabilitást biztosító, ~ 10 mm vastagságú acéllemezből készül, általában hegesztett kivitelben. A fűtőharangot daruval mozgatják, a kemencealapra való illesztést, pedig a megvezető-csapok szolgáltatják.

Ha a betét hőkezelése semleges kemenceatmoszférát igényel, akkor ezt védőtok alkalmazásával (indirekt tüzelés) és semleges védőgázt keringtető ventilátor együttes beépítésével oldják meg (2. ábra).

Ha a betét közvetlenül nem érintkezhet az égőkből kilépő füstgázzal, akkor indirekt tüzelést, pl. sugárzócsöves hevítést alkalmaznak.

Az energiahordozók drágulása, a környezetvédelmi és nem utolsósorban a biztonságtechnikai elvárások szigorodása, fokozatosan megváltoztatta a kemencék, ezen belül természetesen a modern harangkemencék fejlesztésének trendjét.

A nagy tömegsűrűségű bélésanyagokból készített falzatokat kiváltották a könnyű kerámiaszál alapanyagból készült szigetelőpaplanok, vákuumformázott bélésidomok, valamint a legkorszerűbbek előre beintegrált fűtőelemekkel készülnek. Energia-megtakarításuk az alkalmazott technológiáktól függően, 40...60 %-ot eredményez. Felfűtési sebességük több mint kétszerese a hagyományos tűzálló és hőszigetelő anyagokkal szemben, ami jelentős munkaidő megtakarítással is jár [7, 41, 42].

Laboratóriumi viszonyok között részletes vizsgálatokat végeztem, vákuumformázott kerámiaszálból kialakított béléstestű harangkemencével. A béléstest előre beintegrált $\varnothing 1,2$ mm-es KANTHAL A1- es fűtőhuzalból kialakított villamos ellenállás-fűtéssel készült, 1400 W villamos teljesítménnyel, ~ 230 V; 50 Hz működtető hálózati feszültségre. A berendezés saját tervezésű és építésű hőkezelő kemence, fényképe az 1-es számú mellékletben látható. A microCAD - SYSTEM '93 Nemzetközi Informatikai Találkozón, II. helyezést értem el a kemencével és az automatizált működést biztosító szoftverrendszerrel [79, 80]. A többször ismételt méréseim bizonyították az adott berendezésre, hogy a kemence felfűtési sebessége 50 °C/min, az önmagára hagyott rendszer visszahűlését vizsgálva, a hűlési sebesség ~ 1 °C/s-ra adódott. A kemence térhőmérséklete $T_{\max} = 1250$ °C.

A hőmérsékletet NiCr-Ni hőelemmel mértem, a hőelem analóg jelét, egy ANALOG DEVICES típusú ADC-1100-as 11 bites A/D konverter dolgozta fel. A megfelelő összeköttetést kompenzációs vezeték biztosította a hőelem és a hőmérsékletmérő elektronika között (16. ábra). Az

ellenőrzést analóg kijelzésű (mutató) hőmérsékletmérő műszer szolgáltatva. Az A/D konverter digitalizált jeleit, egy PC AT kompatibilis számítógépbe helyezett I/O kártya fogadja, melybe INTEL típusú 8255 PIO áramkör került beépítésre.

A kiértékelő szoftvert *Turbo Pascal 6.0* nyelven készítettem el, *real-time* üzemmódban, grafikus felület felhasználásával [22, 79, 80].

A harangkemencék korszerűsítése és fejlesztése lehetővé tette alkalmazási területük kiszélesítését, amit példaképpen az alábbiakban szeretnék bemutatni [23, 24, 25]:

- *szferoidizációs lágyítás;*
- *színesfém fél késztermékek fényes lágyítása;*
- *hengerelt tekercsek gyorsított hűtése;*
- *lágyító hőkezelés;*
- *újrakristályosító lágyítás, védőgáz alatt.*

Az energia-megtakarítás hatékony módja, a távozó füstgáz entalpiájának a részleges visszanyerése, konvektív ill. kombinált konvektív-sugárzó elveken működő rekuperátorok alkalmazásával.

Tovább vizsgálva a gáztüzelés adta új lehetőségeket, tüzelőberendezésként rekuperatív elven működő égőkonstrukciókat is alkalmaznak, mivel beépítésük, üzemeltetésük, szervizelésük lényegesen egyszerűbb, a rekuperátorokénál és energia-megtakarításuk jelentős.

A DUNAFERR-Voest Alpine Hideghengermű Kft. Hőkezelő Üzemében működő hőkezelő harangkemencék a 60-as évek közepén szovjet tervek alapján épültek. A kohógáz és a kamragáz meghatározott arányú keverékével üzemeltetett injektoros égők hátránya az volt, hogy a környezetre káros anyag kibocsájtás (CO, SO₂, NO_x) rendkívül nagy volt.

A harangkemencék EBNER vagy RADCON típusúak. A tüzelési rendszer korszerűsítéseként, a különleges feladathoz a legtöbb szempontból is megfelelő PYRONICS típusú, HS jelzésű, nagy kiáramlási sebességgel

és ezáltal intenzív recirkulációs hatással üzemelő égőt terveztek és építettek be [26].

Hasonló hőtechnikai újdonságokat találhatunk égőkonstrukció, gáz és levegőoldalon, szerelvényezés, műszerezettség, valamint recirkuláltatás, rekuperáció, vezérlés és szabályozás tekintetében, a következő berendezéseknél [27, 28, 29, 30]:

- **GRÜNEWALD *High-Capacity Bell Type Annealing Furnaces*;**

- **LOI HPH *bell-type annealing plants*;**

- **HICON EBNER**

termékeinél.

A mikroelektronika, ezen belül a mikroprocesszorok, mikrokontrollerek, PC-k, PLC-k, PV-k, DCS rendszerek, célorientált egy chip-es mikrogépek, digitális szabályozók igen gyors és nagyarányú fejlődése, valamint az alkalmazott szerkezeti anyagokkal szemben támasztott igen magas követelmények, már évtizedekkel ezelőtt is elengedhetetlenné tették a korszerű digitális vezérléstechnika és a szabályozástechnika alkalmazását, a harangkemencék üzeménél is.

Természetesen nélkülözhetetlen követelmény az automatikus kemenceharang mozgatás, betétadagolás, valamint a tüzelőanyag/levegő arányszabályozás és a hőmérséklet megfelelő tűrési intervallumban való tartása. Erre megfelelő hardverek, szoftverek, hibajavító rendszerek készülnek, melyeket naplózási funkciókkal kell ellátni. Ezeknek a feladatoknak a minél pontosabb ellátására, centralizált és decentralizált komplett irányítórendszerek készülnek, melyek emberi beavatkozás nélkül önmagukra hagyva, önállóan működnek. Az ilyen irányú szoftverek kidolgozásához a 4 és 5. fejezetben megoldási alternatívákat mutatok be, a konstrukcióra jellemző átviteli függvények meghatározására, ami elengedhetetlen a folyamatábrák, majd az algoritmusok elkészítéséhez.

A mai modern kemencefejlesztési irányelveknek, az előzőekben említetteket, minden esetben szem előtt kell tartania [2, 3, 4, 5, 6, 14, 20, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 45, 49, 53, 57, 66, 68, 69, 83].

3. A gáztüzelés vagy az elektromos fűtés dilemmája

A hőkezelési technológiák fejlesztése szükségessé tette a korszerű hőkezelő berendezések kifejlesztését. Az utóbbi tizenöt évben végzett ez irányú kutató és fejlesztő munkák eredményezték az adott feladatokhoz a legalkalmasabb típusberendezések megtervezését, kivitelezését, beüzemelését. Ezek figyelembevételével az adott feladatokhoz kiválasztható a legmegfelelőbb berendezés, a következő legfontosabb paraméterekhez alkalmazkodó igényeknek megfelelően:

- **technológiai igény** (hőkezelési hőmérséklet, hőmérséklet homogenitása, szabályozási-vezérlési lehetőségek, felületminőség);
- **az időegység alatt hőkezelhető betéttömeg;**
- **hatásfok** (az energia és a beruházás költségeinek egységnyi tömegű betétre mutató kivetítése).

A fűtési mód alapján ezen berendezések lehetnek a tüzelőanyaggal közvetlenül vagy közvetve érintkező direkt vagy indirekt fűtésűek. Ezen belül vizsgálatom tárgyát képező harangkemencék lehetnek gáztüzelésű, ill. villamos ellenállás-fűtésű hőkezelő berendezések.

Direkt fűtés és gáztüzelés esetén, a betéttel közvetlenül érintkezik a hőleadó füstgáz, (bizonyos esetenként védőgáz) ami konvektív, sugárzásos és szelektív füstgázsugárzással adja le a hőt a hőkezelendő betétnek, valamint a kemencefalnak, ami visszasugároz a betétre.

Indirekt fűtés esetén, bizonyos jellemző hőkezelési okok miatt a füstgáz nem érintkezhet a betéttel, tehát a hő a füstgáz és a betét közötti elválasztó tokon keresztül vezetéssel és sugárzással terjed. A kemence fenékrésze fix helyzetű, erre helyezik rá a betétet, (pl. kerékabroncs, tekercselt acél, fémszalag, stb.) majd ráemelik a tokot, végül a kemence un. harang alakú testét az égőkkel és a hozzájuk tartozó gáz/levegő szerelvényekkel együtt.

A tüzelőanyag és a levegő rendszerbe, a legmegfelelőbb égési (revésedési) paraméterek beállításához célszerű gáz/levegő arányszabályozót beépíteni, mivel automatikus szabályozással, (PC, PLC, PV, DCS, mikrokontroller, célorientált mikrogép, digitális szabályozók) a legmegfelelőbb tüzelési

értékek beállíthatók, ellenőrizhetők, korrigálhatók. A fent említett mikroelektronikai rendszerek, megfelelő algoritmusok (pl. PID) alkalmazásával a legjobb hőmérséklet szabályozási funkciókat is ellátják [88].

A harangkemencék szakaszos üzeműek (felfűtés-hőntartás-lehűlés vagy lehűtés). A harang alakú testet mozgatják, a kemencén tengelyirányban vagy tangenciálisan helyezik el az égőket, a gáz és a hozzájuk tartozó égési levegőrendszer csatlakozó pontjait régebben flexibilisen, ma már fixen alakítják ki. A füstgáz megfelelő eltávolításához, precízen méretezett füstgázvezető rendszert kell alkalmazni, esetleg ejektoros megoldással, a jobb huzat elérése érdekében.

A harangkemencék térhőmérséklete viszonylag elég nagy (1000...1300 °C), ezért a távozó füstgáz entalpiáját, célszerű konvektív ellenáramú rekuperációs elven működő hőhasznosító berendezéssel részben visszanyerni. Ezek általában fémből készülők, típustól és gyártmánytól függően, elég drága berendezések. Hátrányuk az, hogy élettartamuk viszonylag rövid, kb. 1-3 év, könnyen deformálódnak hő hatására, drága hőálló ötvözött acélból kell építeni, hegesztett vagy öntött kivitelben. Az üzemidő előrehaladtával hőátbocsátási tényezőjük [2]:

$$k = 120 \dots 30, \text{ W/m}^2\text{K}$$

rohamosan csökken.

A füstgáz megengedhető legnagyobb beáramlási hőmérséklete:

$$T_{\text{fsg}} = 900 \text{ °C}$$

lehet, nagyobb füstgáz hőmérséklet esetén hideg levegő hozzákeverésével hűtik.

A levegő előmelegítésének átlaghőmérséklete általában 400 °C.

Relatíván kis méretűek, tömítettségük kedvező, ezért néhány típusa alkalmas gáz előmelegítésére is. Az előmelegítési hőmérséklet növekedésével rohamosan nő a rekuperátor fűtőfelülete, ill. költsége. Ebből következően csak addig célszerű és gazdaságos növelni az előmelegítendő levegő hőmérsékletét, amíg a megtakarított tüzelőanyag

értéke nagyobb, a fűtőfelület növeléséből keletkező beruházási többletköltség amortizációs hányadánál. A rekuperátor fűtőfelülete [2]:

$$A = \frac{\Phi}{k \Delta T \eta}, \text{ m}^2;$$

[Φ]: a füstgáz, ill. a levegő hőárama, W;

[k]: hőátbocsátási tényező, W/m²K;

[ΔT]: hőmérséklet, °C;

[η]: rekuperátor hatásfok, %.

A levegő előmelegítési hőmérsékletének gazdasági optimuma ott van, ahol a tüzelőanyag és a rekuperátor költségének az összege üzemórára vetítve a minimális. A költségek összege [2]:

$$K = \frac{a A}{t} + b q, \text{ Ft/h};$$

[a]: a rekuperátor fajlagos költsége, Ft/m²;

[t]: a rekuperátor élettartama, h;

[b]: a tüzelőanyag egységára, Ft/GJ;

[q]: a kemence hőterhelése, GJ/h.

Célszerű az adott feladat energiatakarékosabb kemenceüzemeltetési igényét megvizsgálva, (számítás, méretezés, tervezés, kivitelezés, beüzemelés) tangenciális elhelyezésű, korszerű rekuperátoros égőket alkalmaznunk, mivel beépítésük, üzemeltetésük, karbantartásuk nem jár olyan nehézséggel, mint a fémrekuperátorok alkalmazása. Ezen égők működésének lényege az, hogy az égési levegőt nem a füstcsatornában összegyűjtött füstgáz útvonalában elhelyezett hőhasznosító segítségével melegítik elő, hanem az égő egyben rekuperátor is, mivel a tüztérből a füstgáz, a levegőköpenyre elhelyezett, ún. füstgázköpenyen keresztül áramlik, (a jobb hőleadás nagyobb fűtőfelület érdekében bordázott) majd lehülve távozik a kéménybe [84, 85, 86, 87].

A harangkemencék energiagazdálkodási szempontból történő falazatkorszerűsítése, kis hőtároló képességű, kis tömegsűrűségű, kis hőveszteséggel járó kerámia bázisú szálanyagok használatával jelentős mértékű falazatvesztés csökkenéssel és a falazatban tárolt hő lényeges mérséklésével jár. A részletes számításokat és eredményeket az 5.4. fejezet tartalmazza.

Gáztüzelés esetében, régebben a harangkemencék falazatát minimálisan két rétegből építették fel, ami egy relatíve vékony vastagságú munkabélésből, valamint egy hőszigetelő rétegből állt. *Ma a legkorszerűbb megoldás az, hogy egyetlen rétegből áll, ez önhordó és egyben hőszigetelő funkciót is betölt, kerámiaszál alapanyagból készül, példaként említve Z-blok-ból* (2. ábra) [12]. *Természetesen a gázégőkől kijövő nagy impulzusú, turbulens áramlású füstgáz, a kerámiaszálal lesodorhatja. A probléma kiküszöbölésére különböző gyártmányú* (pl. PREFAM tip.) *és hőmérsékletfüggő ragasztóanyagokat alkalmaznak* [8, 9, 10, 11, 12, 59, 63, 72].

Hasonló megoldások születtek a DUNAFERR WA hideghengermű Kft. üzemében működő harangkemencék energetikai és környezetvédelmi korszerűsítési program keretén belül [26].

Az alábbiakban bemutatandó és ismert tüzeléstani alapösszefüggések, a gáztüzelésű harangkemencék tervezéséhez elengedhetetlenek [2, 3]:

- *elégetés előtti tüzelőanyag-vesztés*: $\Phi_{\text{ta ve}} = Ha_g \cdot \dot{V}$, kJ/h;

[\dot{V}]: a kiáramló tüzelőanyag térfogatárama, m³/h-ban;

- *kilángolási (tömítetlenségi) veszteség* [2]:

$$\Phi_{\text{kiláng}} = \dot{V}_{\text{láng}} \cdot Ha_{\text{láng}} \cdot c_{p\text{láng}} \cdot T_{\text{láng}}, \text{ kJ/h;}$$

a kiáramló láng térfogatárama:

$$\dot{V}_{\text{láng}} = 3600 \cdot \varphi \cdot A \cdot w, \text{ m}^3/\text{h;}$$

átömlési tényező: $\varphi \cong 0,85$;

- falazatvesztés meghatározása:

sík, hengeres és gömb kialakításokra [1, 2] irodalmak szerint történik, kJ/h;

- sugárzási veszteség a Stefan-Boltzmann-egyenlettel számítható:

$$\Phi = \varepsilon C A [(T_{\text{belső}} / 100)^4 - (T_{\text{külső}} / 100)^4], \text{ kJ/h;}$$

- füstgázvesztés:

$$\Phi_{\text{fsg}} = V_{\text{fsg}} \cdot c_{\text{pfsg}} \cdot T_{\text{fsg}}, \text{ kJ/h;}$$

- hőárammérleg:

$$\Phi_{\text{össz be}} = \Phi_{\text{össz ki}}, \text{ kJ/h;}$$

- kemencehatásfok:

$$\eta_{\text{kemence}} = \frac{\Phi_{\text{hasznos}}}{\Phi_{\text{bevitt}}} \cdot 100 \%$$

A fentiekből az következik, hogy a villamos ellenállás-fűtés esetében, megfelelően választott felületi terhelésű (W/m²) KANTHAL ellenállás-huzalt használunk fűtőelemként, bonyolultabb égőkonstrukciók, szerelvényezések, rekuperátorok, rekuperatív égők, füstgázvezető csatornák, kémények alkalmazása helyett. Ez viszont azt vonja maga után, hogy az üzemcsarnokban megfelelően kialakított 3 fázisú, 400 V (1995-től) működtető feszültségű villamos hálózat kiépítése szükséges.

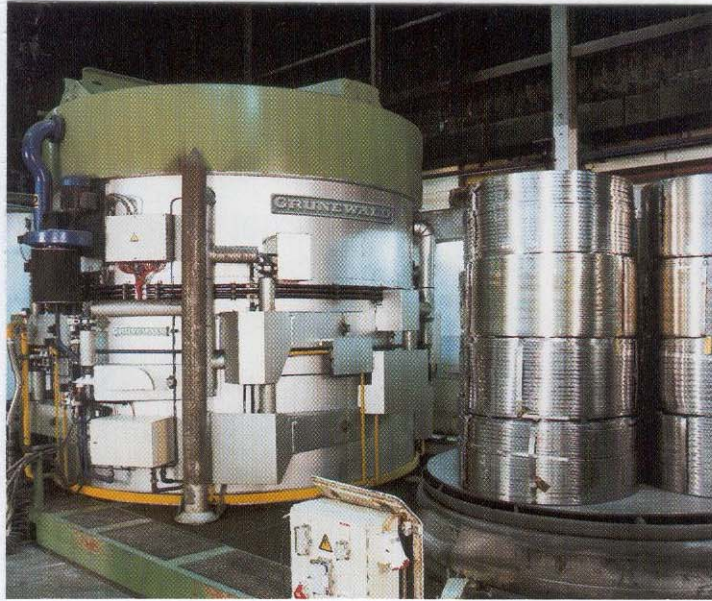
Az 5.4. fejezetben ismertetésre kerülő harangkemence Ø 6 mm vastagságú KANTHAL típusú villamos ellenállás-huzal fűtéssel van ellátva, függőleges irányban négy sorban. Ezek a sorok külön-külön szabályozhatók, a homogénebb térhőmérséklet elérése érdekében.

Ma már falazatként önállóan alkalmazzák a kerámiaszál bázisú anyagokat, amelyek a hagyományos megoldásokkal szemben jóval kisebb hő tárolnak, jelentős energia-megtakarítást eredményezve.

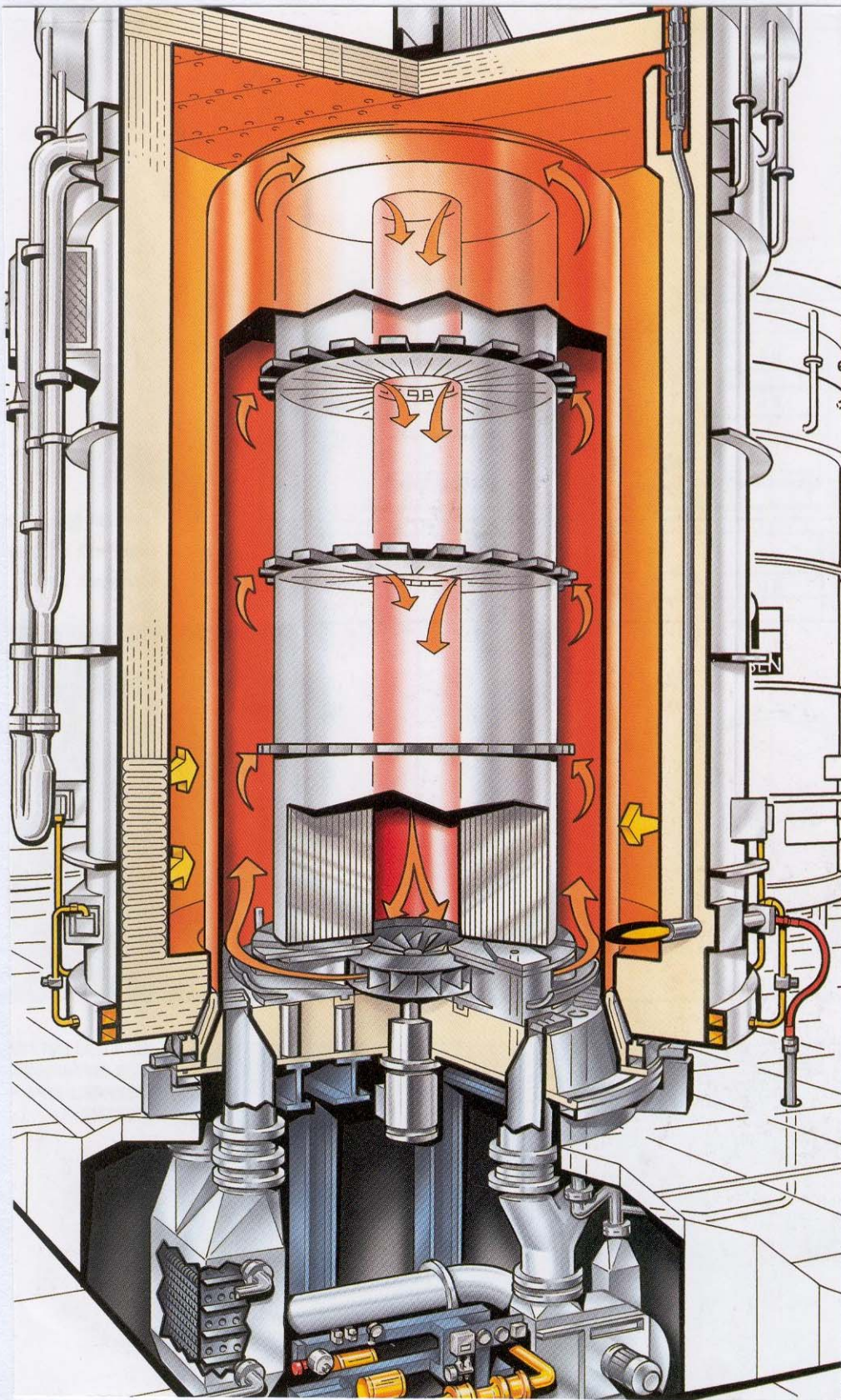
Végezetül, de nem utolsó sorban a gázégőkkel felszerelt harangkemencék hátránya a füstgázban jelentős mértékben távozó környezetre káros anyag kibocsátás CO, SO₂, NO_x formájában.

Mind a gáztüzelés, mind pedig a villamos ellenállás-fűtés esetében, a harangkemencéket csoportosan telepítik, azért, hogy a hűlő anyagról a leemelt harangot egy másik fenékrészen előkészített áruhalmazra tegyék. Fenékrészüket homokzárral körbevéve készítik el, a tömítettség és a hőszigetelés miatt [8, 14, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 37, 38, 41, 42, 47, 51, 53, 68].

Korszerű gáztüzelésű teljesen automatizált (vezérlő, szabályozó és ellenőrző), rendszerrel ellátott kemencék fényképei láthatók az 1. és a 2. ábrákon.



1. ábra Automatizált gáztüzelésű harangkemencék



2. ábra Automatizált gáztüzelésű harangkemencék

4. A hőkezelés gazdasági vonzata

A hőkezelő berendezések falazatán keresztül eltávozó hőmennyiség, a hőveszteségek jelentős részét teszi ki. A falazatveszteség csökkentésével jelentős mennyiségű tüzelőanyagot, ill. villamos energiát lehet megtakarítani. Gáztüzeléskor számolnunk kell az elégetés előtti tüzelőanyag-veszteséggel, kilángolási (tömítetlenségi) veszteséggel, valamint füstgázveszteséggel. Természetesen villamos fűtés esetében, a fenti veszteségtételek nem szerepelnek.

Ezek mellett a hagyományos falazat által felvett és abban tárolt hő is lényeges veszteségeket okoz, a korszerű kemencefalazat építőanyagaival szemben, ami jelentős tételként számolható el a hőárammérlegek készítésénél.

A kemencék falazatának kialakításánál és méretezésénél régebben a tervezők elsősorban arra törekedtek, hogy a falazat tartós legyen, a hőveszteségek csökkentésére nem helyeztek kellő hangsúlyt. Hőtechnikai számítást csak esetenként vagy részben végeztek, ami a viszonylag olcsó energiaárak korszakában esetleg még megengedhető volt. Az energiahordozók árának rohamos növekedése, ami megközelíti az éves 25 %-ot, arra ösztönözte a tervezőket, gyártókat, üzemeltetőket, hogy könnyű, kis testsűrűségű tűzálló és egyben hőszigetelő anyagokat fejlesszenek ki, amelyek a falazatveszteséget, ill. a bennük tárolt hőt jelentős mértékben csökkentik, ezáltal értelemszerűen jelentős mértékben csökken a tüzelőanyag és a villamos energia fogyasztása is. Tehát helyes út az, hogy az új kemencék falazatainak bélésanyagait ilyen könnyű tűzálló és hőszigetelő anyagok alkalmazásával kell megtervezni és kivitelezni.

A korszerűsítésének jelenleg járható útja, a kemencék falazatának könnyű energiatakarékos kivitelben történő átalakítása.

Tervezéskor nem célszerű egyetlen falazatkonstrukciót felvenni, mivel több megoldás közül kell a legcélravezetőbbet és egyben a leggazdaságosabbat kiválasztani, az adott feladatnak megfelelően. Nagy figyelmet kell fordítani a falazat tervezésekor az üzemmenetre (szakaszos) vonatkozóan. Vizsgálatom tárgyát, kizárólag a szakaszos üzemű gáztüzelésű és a villamos ellenállás-fűtésű harangkemencék képezik.

Amennyiben villamos ellenállás-fűtést alkalmazunk és a fűtőszálak függőlegesen több (pl. 4) sorban helyezkednek el („Hámor Rt.” hőkezelő harangkemencék esetében), akkor fűtési sorokat külön-külön szabályozással kell ellátni, valamint a homogénebb térhőmérséklet és a nagy pontosságú hőmérséklet tartása érdekében, célszerű PID szabályozót alkalmazni. A grafikus megjelenítést és dokumentálást *real-time* módban, PC-n futó szoftverrendszerek biztosítják, melyek előre beépített hőkezelési paramétereket tartalmaznak, ill. szabadon programozható lehetőséggel is rendelkeznek. Ma elengedhetetlen követelmény, az automatikus betétadagolás és a kemenceharang emberi beavatkozás nélküli önálló mozgatása. Az ilyen automatizált berendezések falazatait önhordó, és egyben relatíve minimális vastagságú, tömegsűrűségű ($\sim 240 \text{ kg/m}^3$) vákuumformázott idomelemből, vagy előre beintegrált fűtőelemekkel készítik. Ezek a falazatok sérülékenyebb voltak ellenére, jól bírják a szakaszos üzem által előidézett nagy hőingadozásokat, élettartamuk automatikus működtetés esetén jóval meghaladja a hagyományos falazóanyagokét [42].

Terveztem és építettem, egy automatikus működésű, szakaszos üzemmenetű, elektromos ellenállás-fűtésű, laboratóriumi méretű, vákuum munkaterű, porcelán hőkezelő kemencét, vákuumformázott falazattal, előre beintegrált fűtőelemmel, laboratóriumi vizsgálatok céljára. Az általam készített működtető vezérlő és szabályozó szoftverrendszer, PC-n keresztül kommunikál a kemencével [22, 79, 80].

A falazatveszteség számítása a többszörös iterációs problémák, ill. a nagyszámú variációs lehetőségek miatt elég hosszadalmas és viszonylag pontatlan, ezért célszerű a számítást számítógépen futó programokkal elvégezni.

Ilyen megfontolásból elkészítettem *adott hőmérsékleti intervallumokban, a hővezetési tényező értékét kiszámító szoftvert*, valamint az „*n*” *rétegszámú síkfal fajlagos és teljes falazatveszteségét, a réteghőmérsékleteket és az adott rétegek átlaghőmérsékleteit (grafikus vizualizációval is ellátva)* meghatározó szoftvereket, *stacioner állapotra vonatkoztatva*.

Ezeknek a programoknak a többszöri futtatásával, viszonylag gyorsan és pontosan meghatározhatók, a leggazdaságosabb és legcélravezetőbb falazatkonstrukciók.

A kemencebélés tervezésének a hagyományos módja az, hogy felvesszünk egy kemencebélés konstrukciót, majd kiszámítjuk a rétegek

$$\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{\lambda_i}$$

hőellenállásait, valamint a fajlagos és a teljes falazatveszteséget. Azonban a fal külső hőmérséklete először csak becsült érték (amely nagyban függ az egyes rétegek hővezetési tényezőinek az értékeitől), ezért a hőveszteség számítását többször ismételni, azaz iterálni kell addig, amíg a felvett adatok nem közelítenek a számított értékekhez.

Bélésanyagként különböző anyagkombinációkat lehet felhasználni, mint pl. *könnyű tűzálló és hőszigetelő beton, szálal anyagokból készült paplanok, táblák, idomok, vákuumformázott elemek, kőzetgyapot* termékek stb. A kemencebéléseket régebben 2...4 különböző tűzálló és hőszigetelő anyagkombinációkból állították össze. A bélés belső meleg oldala, az un. munkabélés, ez a réteg különböző tartós igénybevételeknek van kitéve. Megfelelő melegszilárdsággal kell rendelkeznie, és ellenállónak kell lenni a mechanikai igénybevételekkel szemben. Ma a legkorszerűbb kemence tervezési filozófia általában egy réteget alkalmaz.

Természetesen ez az egyetlen rétegből álló kemencebélés, a *munkabélés* és a *hőszigetelő réteg* funkcióit tölti be egyidejűleg (2. ábra Z-blok) [12].

Azonban fontos tény az, amit tervezéskor, főleg szakaszos üzemmenet esetében, figyelembe kell venni, hogy a munkatér viszonylag hamar felmelegszik, ez viszont azt vonja maga után, hogy a hőszigetelő-képesség jósága miatt, az un. hidegoldal (kemence páncélzat) csak igen lassan melegszik fel. Ez párasodást, vízgőzképződést okoz, ami a kemence páncélzatának idő előtti korrózióját okozza. Gáztüzelés esetében, a nagy sebességű turbulens áramlású füstgáz, kerámiaszál sodró hatását speciális ragasztó, ill. felületkeményítő eljárásokkal küszöbölik ki.

A szakaszos üzemidők betartása mellett, a falveszteséget, a bélésanyagok hőellenállásainak a legalkalmasabb megválasztásával lehet megfelelő értéken tartani.

A pontos számításokhoz ismernünk kell az egyes tűzálló és hőszigetelő anyagok hővezetési tényezőit a hőmérséklet függvényében, valamint az entalpiák számításához szükséges fajlagos hőkapacitás értékeit.

A hővezetési tényező értékeit a tűzálló és hőszigetelő anyagokat gyártó és forgalmazó cégek katalógusadataiból tudjuk tervezési segédletként felhasználni. Célszerű számításokat végezni azonos belső és külső falhőmérséklet, azonos falveszteség ill. hőellenállás mellett, a különböző rendelkezésre álló egy rétegből készült homogén bélésanyagok vastagsága, testsűrűsége, tömege, a tárolt hő entalpiája és anyagköltsége szempontjából. Levonható konklúzió az, hogy jelenleg a legjobb hőszigetelő anyagok a szálas anyagok, mivel azonos külső falveszteség és hőellenállás mellett nagyságrendileg kisebb a bélés vastagsága, tömege és így a tárolt hő mennyisége is.

Számításokat végeztem az általam kidolgozott szoftverrendszerrel, az algoritmus kidolgozásának és helyességének az alátámasztása érdekében. Korszerű és hagyományos tűzálló anyagokból készült kemencebélések vastagságát vizsgáltam, a szoftverekkel. A számítások alátámasztották az általam felállított algoritmusok helyességét. Ez egyértelműen bizonyította azt az ismert tényt, hogy a kemencebélések vastagsága különböző típusú szálkerámia alapanyagból készített különböző típusú és kivitelű béléstestek alkalmazása esetén, a bélés vastagsága ~ 1/10-ére csökken, a hagyományos anyagokéhoz képest. Példaként, SIBRAL alapanyagból készült vákuumformázott technológia esetén, a munkabélés tömege 86 %-kal kevesebb volt, mint a samott bélésanyagé. Vákuumformázott technológia esetében 240 kg/m^3 , T4 minőségű samott alkalmazásakor pedig, 1850 kg/m^3 megadott tömegsűrűséggel számoltam [2, 3, 8, 42].

Természetesen a bélés tömegének ilyen drasztikus mértékű csökkentése, különösképpen szakaszos üzemre vonatkoztatva, a falazat felmelegítéséhez szükséges, ill. a falazatban tárolt entalpiák értékeinek ilyen nagy arányú csökkenését eredményezi. Ezen szálasanyagok alkalmazásának hátránya a könnyű mechanikai sérülékenység, ami automatikus betétadagolással, ill. kemenceharang működtetéssel kiküszöbölhető.

Számításaim és vizsgálataim eredményeként, hőkezelési ciklusokra vetítve (8 h), kerámiaszál bázisú, szórt falazat alkalmazása esetén, 4 h 55 perces munkaidő-megtakarítást értünk el. Ezzel szemben

a hagyományos konstrukció hőkezelési ciklusa, 12 h 55 perc volt. Az időkülönbség éves (365 nap) szintre vetítve, 1795 h-át jelent. 8 h-ás munkanapot számítva, ez éves szinten 224 munkanap időmegtakarítást eredményezett, ami igen figyelemre méltó ~ 61,3 %-os javulást jelentett. Az általam vizsgált szálerámiás bélésű, villamos ellenállás-fűtésű harangkemence és a hagyományos falazatkonstrukció között 861 kWh, ill. 2206 kWh villamos energiakülönbség adódott, ami ~ 60,7 %-os villamos energia-megtakarítást jelentett.

A fenti adatok azt igazolják, hogy az optimálisnál kisebb külső falhőmérsékletnél, a bélésanyag költsége jelentős mértékben megnövekszik, az energiahordozó árának növekedéséhez képest.

Az optimális külső falhőmérséklet meghatározása, az alábbi módon vizsgálható:

- *különböző külső falhőmérséklet esetére, 1 m² felületre meg kell határozni a kemencebélés falveszteségének ellentételezéséhez évente szükséges tüzelőanyag vagy villamos energia mennyiségét, költségét;*
- *ki kell számítanunk az 1 m² kemencebélés 1 évre eső beruházási, karbantartási költségét;*
- *meg kell határoznunk különböző falhőmérséklet esetére a tárolási hőveszteség ellentételezéséhez évente szükséges tüzelőanyag vagy villamos energia mennyiségét, költségét.*

A bélés üzemköltsége = a falveszteség ellentételezéséhez szükséges tüzelőanyag vagy villamos energia éves költsége + a tárolási hőveszteség ellentételezéséhez szükséges tüzelőanyag vagy villamos energia éves költsége + a kemencebélés egy évre eső költsége.

Ezt az általánosított tényt, villamos ellenállás-fűtésre és gáztüzelésre a következő összefüggésekkel írhatom le:

$$\text{Bümk}_{(v)} = \text{Falv}_{(g, v)} + \text{Táhv}_{(v)} + \text{Kmbk}_{(v)};$$

$$\text{Bümk}_{(g)} = \text{Falv}_{(g, v)} + \text{Táhv}_{(g)} + \text{Kmbk}_{(g)}.$$

Ilyen irányú kutatásaimat villamos ellenállás-fűtésű és gáztüzelésű kemence-falazatokra vonatkozólag, a következő empirikus egyenlettel támaszthatom alá:

$$\text{Bümk}_{(v)} = \text{Falv}_{(g, v)} + 0,05 \cdot \text{Táhv}_{(g)} + K_f \cdot \text{Kmbk}_{(g)}.$$

Az egyenlet alkalmazható a következő kiinduló paraméterek esetében:

- *maximális térhőmérséklet $T_{max} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$;*
- *a munkabélés T4 minőségű samott 1850 kg/m^3 , gáztüzelésre vonatkoztatva;*
- *a hőszigetelő réteg kerámiaszál paplan, 128 kg/m^3 tömegsűrűségű, gáztüzelésre vonatkoztatva;*
- *kerámiaszál bázisú, önálló, önhordó vákuumformázott falazatidom, 240 kg/m^3 tömegsűrűségű, villamos ellenállás-fűtésre vonatkoztatva;*
- *belső hőátadási tényező $\alpha_b = 40 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$;*
- *külső hőátadási tényező $\alpha_k = 10 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$;*
- *külső levegőhőmérséklet $T_k = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;*
- *külső falhőmérséklet $T_{fal} = 61 \text{ }^\circ\text{C}$.*

Az empirikus egyenlet betűkombinációinak jelölése:

[$\text{Bümk}_{(v)}$]: a bélés éves üzemköltsége villamos fűtésre vetítve, Ft/m²a;

[$\text{Falv}_{(g, v)}$]: a falveszteség ellentételezéséhez szükséges tüzelőanyag ill. villamos energia éves költsége, gáztüzelésre és villamos ellenállás-fűtésre vonatkoztatva, Ft/m²a;

[$\text{Táhv}_{(g)}$]: a tárolási hőveszteség ellentételezéséhez szükséges tüzelőanyag éves költsége gáztüzelésre vetítve, Ft/m²a;

[$\text{Kmbk}_{(g)}$]: a kemencebélés éves költsége gáztüzelésre vetítve, Ft/m²a;

[Kf]:költségfaktor = $K_{mbk(v)} / K_{mbk(g)}$.

A vizsgálatom tárgyát képező harangkemencék szakaszos üzeműek, működésüket instacioner állapotban, újszerű aspektusból szeretném az alábbiakban ismertetésre kerülő módon megvizsgálni.

Irodalmakból ismeretes, hogy szakaszos üzemű kemencék falazatvesztése *Heiligenstaedt* szerint két részre bontható:

1. stacioner hőmérsékleti szakaszra jellemző (számítása úgy történik mint folyamatos üzem esetén);

2. a tárolt hő elvesztéséből adódik.

Ez az összefüggés szakirodalmakból ismeretes, egyrétegű fal esetére [2]:

$$Q_{\text{fal tár}} = s \cdot c \cdot \rho \cdot \{[(T_{\text{fal belső}} + T_{\text{fal külső}}) / 2] - T_{\text{környezet}}\}, \text{ kJ/m}^2;$$

[s]:falvastagság, m;

[c]:fajlagos hőkapacitás, kJ/kg°C;

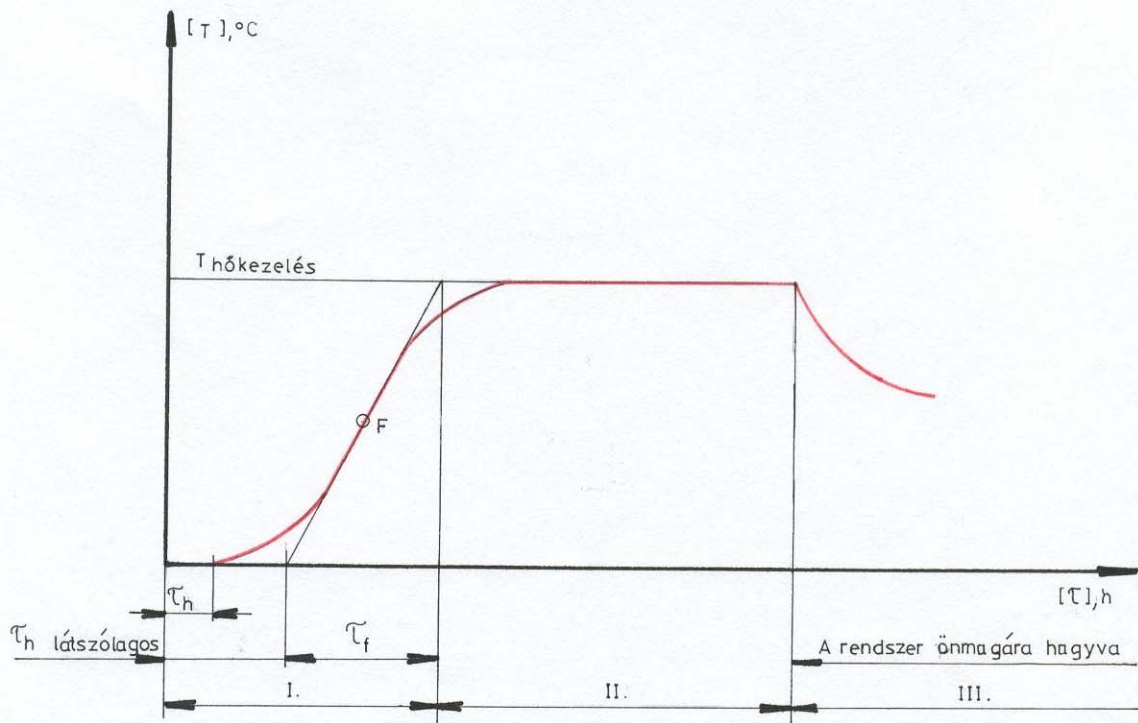
[ρ]:sűrűség, kg/m³.

Ha szakaszos üzemmenet esetében a falazat nem hűl le a környezeti hőmérsékletre, abban az esetben a falazati hővesztés a falazat hőmérséklet csökkenésével arányos.

A szakaszos üzemre vonatkozó jelleggörbe szakaszait a 3. ábra tartalmazza.

Vizsgálatomat szórt falazattal ellátott szakaszos üzemű harangkemencére, mint jelátviteli tulajdonsággal rendelkező szabályozáselméleti kombinált alaptagra végeztem el, az alábbiakban ismertetésre kerülő módon.

A harangkemence falazatát és a benne hőkezelendő betétet (kerékabroncs), **két energiatárolóval ellátott proporcionális és holtidővel kombinált alaptagnak** tételezem fel. A két energiatárolót, a szórt falazat és a hőkezelendő betét együttesen alkotják, mivel a bemenőjel hordozója a villamos fűtés, energiát közöl az átviteli tagok belső szerkezeti elemeivel, amit a tagok, instacioner állapotban átmenetileg tárolnak.



I. Felfűtési szakasz

II. Hőntartási szakasz

III. Lehűlési szakasz, a kemenceharang felemelve, a rendszer önmagára hagyva, a betéttel

3. ábra A szakaszos üzem működési jelleggörbéje

Azért tekinthetem a szóbanforgó kemencét proporcionális jelátviteli tulajdonsággal bíró átviteli tagnak, mivel az átviteli tényező a következő összefüggéssel számítható (bemenőjel:entalpia, kimenőjel:hőmérséklet):

$$A_p = \frac{x_{ki}(t)}{x_{be}(t)} = \frac{\Delta T}{Q_{teljes}}, \text{ } ^\circ\text{C/GJ}.$$

A holtidő jelentése esetünkben az, hogy a bemenő jelként tekintendő villamos fűtés által létrehozott hőmérsékletemelkedés, csak egy bizonyos τ_h , un. holtidő múlva jelenik meg a kimeneten.

Az A_p arányos átviteli tényező meghatározása a hőárammérleg egyenletből történik, részletes számítását az 5.4. fejezet tartalmazza.

A kemence A_p arányos átviteli tényezőjének számítása:

$$Q_{teljes} = Q_{hasznos \text{ (betét)}} + Q_{veszteség}, \text{ GJ};$$

$$Q_{teljes} = 3,1 \text{ GJ};$$

$$\Delta T = 851 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$A_p = \Delta T / Q_{teljes} = 851 / 3,1 = 274,5 \text{ } ^\circ\text{C/GJ}.$$

A fenti gondolatmenetemet folytatva, az alábbiakban bemutatom a proporcionális két energiatárolós és holtidővel kombinált alaptag differenciálegyenletét:

$$\tau_2^2 \frac{d^2 x_{ki}(t-\tau_h)}{dt^2} + \tau_1 \frac{d x_{ki}(t-\tau_h)}{dt} + x_{ki}(t-\tau_h) = A_p x_{be}(t).$$

A fentiekben felírt egyenlet a szakaszos üzemű harangkemence felfűtési jelleggörbéjének a 3. ábrán I.-el jelölt szakaszának matematikai modelljéből felállított differenciálegyenlet. A felfűtési karakterisztika egy reálisan linearizálható jelleget mutat. Szabályozáselméleti vizsgálatomban feltüntetett τ -k időállandókat jelentenek, τ_h a holtidő szerepét tölti be, t pedig a be/kimenőjel megváltozását szimbolizáló időfüggvényt jelenti.

Az ilyen típusú differenciálegyenletek megoldására a matematikából jól ismert **Laplace-transzformáció** az egyik legalkalmasabb módszer.

Ismeretes, hogy egy $f(t)$ pozitív idő-függvény

$$f(t) = 0, \text{ ha } t < 0$$

Laplace-transzformáltján, az s változójú

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt$$

függvényt értjük, ahol $s = \sigma + j\omega$ komplex számot jelent, jelölése:

$$L[f(t)] = F(s).$$

Ha alkalmazzuk differenciálegyenletünkre a **Laplace-transzformációt**, akkor az

$$x_{be}(t) \text{ és az } x_{ki}(t)$$

időfüggvények transzformáltjait, az

$$x_{be}(s) \text{ és az } x_{ki}(s)$$

formában jelöljük.

A differenciálegyenlet megoldását az

$$x_{ki}(t) \text{ időfüggvény,}$$

mint kimenőjel megkeresése jelenti. Ezt a műveletet **inverz Laplace-transzformációnak** nevezzük, jelölése a következő:

$$L^{-1}[F(s)] = f(t).$$

Az átviteli függvényt úgy kapjuk meg, hogy képezzük a ki-és a bemenőjel **Laplace-transzformáltjainak** a hányadosát, majd a számított A_p értékét behelyettesítve, a következő alakú egyenletet kapjuk:

$$Y(s) = \frac{x_{ki}(s)}{x_{be}(s)} = \frac{274,5 e^{-s \tau_h}}{(1 + s \tau_1)(1 + s \tau_2)} .$$

Az utóbbi egyenletben szereplő τ indexei az energiatárolók (falazat, betét) időállandóit, valamint a holtidőt szimbolizálják.

A fentiekből következően levonható az az általánosítható tény, hogy a hőkezelő berendezések helyettesíthetők, jelátviteli tulajdonságokkal rendelkező átviteli tagokkal. Vizsgálatainkat leegyszerűsíthetjük nem aktív (ellenállás, induktivitás, kondenzátor, termisztor) elektrotechnikai elemekből felépített áramkörökkel. Ez a modellezés a tervezés és a vizsgálat fázisaiban jelentős mértékben meggyorsítja, megkönnyíti, minimalizálja a ráfordítandó többletmunkát, költséget és viszonylag pontos képet szolgáltat a berendezésről. Természetesen vizsgálatainkhoz megfelelő matematikai, szabályozásméleti, elektrotechnikai, gyakorlati és konstruktív ismeretre van szükségünk.

A fenti gondolatmenetemet tovább folytatva, ha a $t = 0$ időpillanatban egységugrás jelet, mint fűtésrákapcsolást adunk a kemence fűtőhuzaljaira, akkor az

$$x_{be}(t) = 1(t)$$

bemenőjel hatására, válaszfüggvényként a

$$h(t) = x_{ki}(t)$$

un. átmeneti függvényt kapjuk meg, aminek vizuális jellege hasznos információt nyújt a felfűtés időbeli megváltozásáról ($T(t)$), valamint a vizsgálatom tárgyát képező kemencekonstrukcióról.

Az átmeneti függvényhez az átviteli függvény ismeretében úgy jutunk, hogy az átviteli függvény *inverz Laplace-transzformáltját* megszorozzuk az $1(t)$ egységugrás, mint bemenőjel *Laplace-transzformáltjával*, $1/s$ -sel:

$$h(t) = L^{-1} [Y(s) \cdot 1/s].$$

A fenti összefüggést az általam felírt átviteli függvényre alkalmazva és A_p értékét behelyettesítve, a következő alakú egyenletet kapjuk:

$$h(t) = L^{-1} [274,5 e^{-s\tau_h} / (s + s^2 \tau_1 + s^2 \tau_2 + s^3 \tau_1 \tau_2)].$$

Az *inverz Laplace-transzformációt* elvégezve, az átmeneti függvény, ami a hőmérséklet időbeli változását ($T(t)$) szimbolizálja, a következő alakú lesz:

$$h(t) \Big|_{x_{be}(t) = 1(t)} = T(t) = 274,5 \left[1 + \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-[(t-\tau_h)/\tau_1]} + \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-[(t-\tau_h)/\tau_2]} \right].$$

A fenti összefüggéssel a 4. ábrán látható felfűtési szakasz hőmérséklet/idő ($T(t)$) jelleggörbét számíthatom.

Az egyenletben alkalmazott jelölések:

$[\tau_1]$: a szórt falazat időállandója, h;

$[\tau_2]$: a hőkezelendő betét időállandója, h;

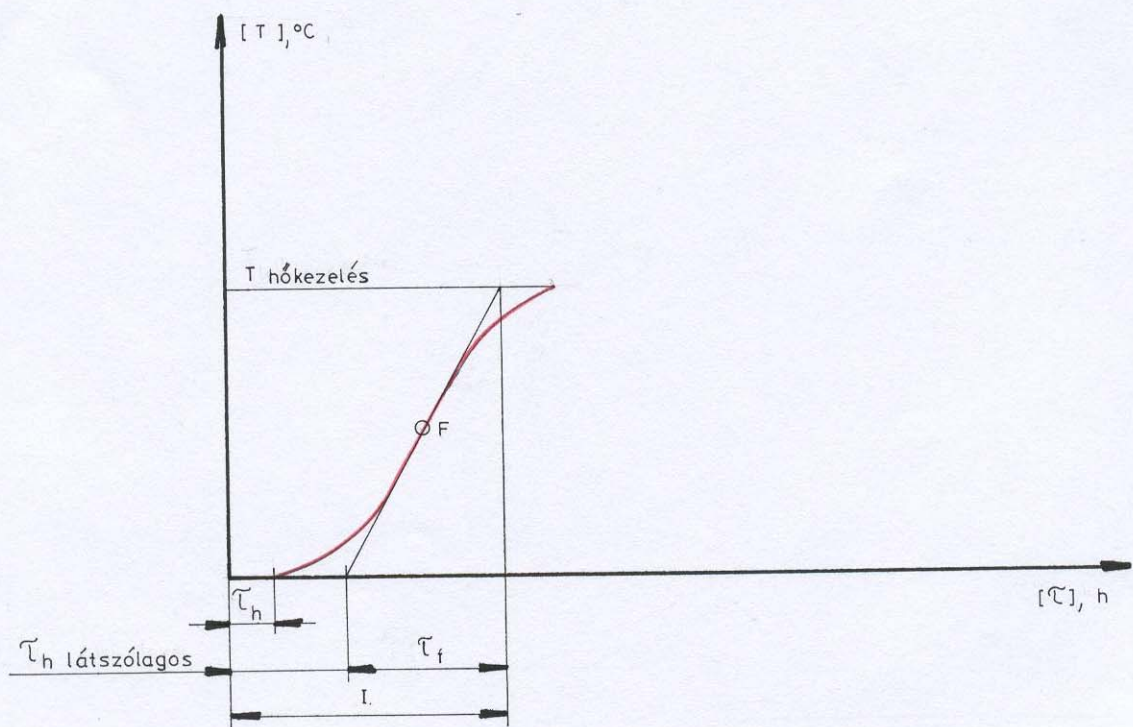
$[\tau_h]$: a zárt rendszer holtideje, h.

Méréseimet ipari körülmények között, a „Hámor Rt.”-ben működő, 140 mm vastagságban felszórt (kerámiaszál bázisú), falazattal ellátott, harangkemencére végeztem el. Eredményképpen a következő adatokat kaptam:

- az átlagértékekkel számolva, a zárt rendszer holtideje $\tau_h \cong 2,5$ h;

- a felfűtési sebesség ~ 200 °C/h-ra adódott.

Amennyiben nem korszerű kerámiaszál bázisú, hanem hagyományos falazóanyagokból készült berendezéseket vizsgálnánk a feni szabályozáselméleti, matematikai modellekkel, akkor a méréseink azt fogják bizonyítani, hogy a τ_h holtidő mértéke, nagyságrenddel nagyobb lesz. A holtidő tartama jelentős mértékben meg fog növekedni, mivel a hagyományos és a korszerű tűzálló anyagok entalpiakülönbsége $\sim 1,9$ -es szorzót eredményez. Az $1(t)$ egységugrás jelnek tekintendő fűtési-rákapcsolás, a hőmérséklet növekedés tekintetében, csak egy bizonyos τ_h holtidő eltelte után fog a kimeneten megjelenni.



4. ábra A felfűtési szakasz alakulásának exponenciális jelleggörbéje

Egy hagyományos (samott-thermolit) falazattal és a hőkezelendő betéttel ellátott kemence két rétegű falazatának thermolit hőszigetelő rétege, egy újabb energiatárolót eredményez, amit az:

$$(1 + s \tau_3)$$

jellemez, ahol τ_3 a thermolit réteg időállandója.

A „Hámor Rt.”-ben vizsgálatom tárgyát képező harangkemence átviteli tényezője:

$$A_p = \Delta T / Q_{\text{teljes}} = 851 / 7,9 = 107,7 \text{ } ^\circ\text{C/GJ}$$

értékűre adódik.

Az átmeneti függvényt, *inverz Laplace-transzformációval* határozhatnánk meg, az alábbiak szerint:

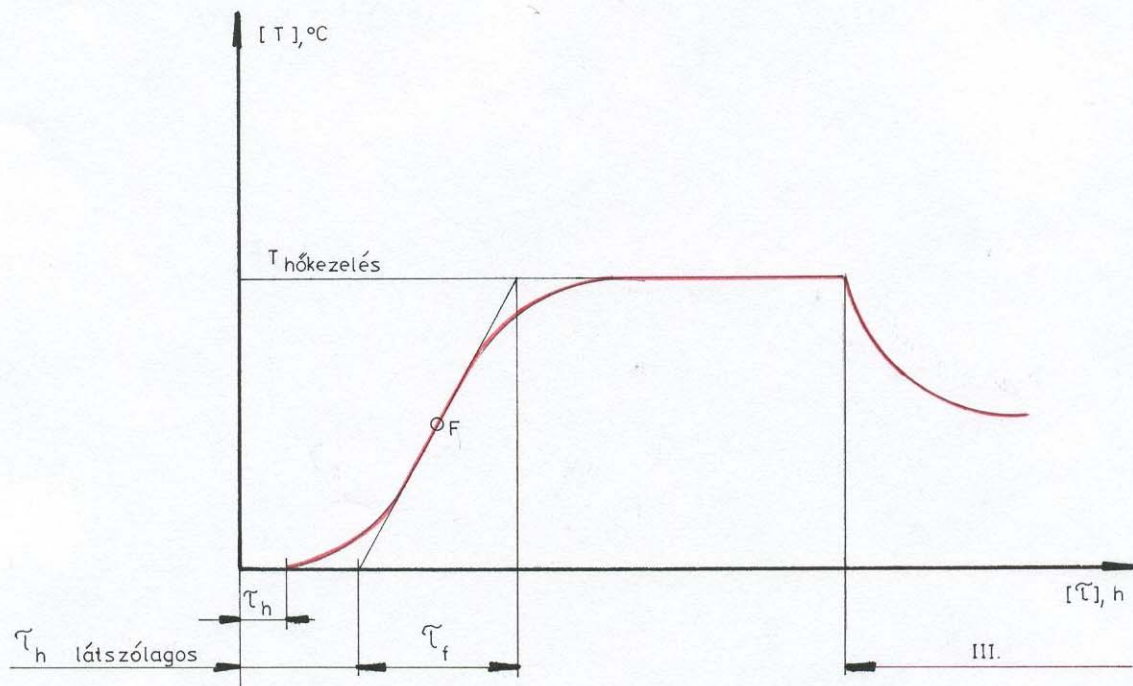
$$h(t) = L^{-1} [107,7 e^{-st} / ((1 + s \tau_1) (1 + s \tau_2) (1 + s \tau_3) s)].$$

A fentiekben közölt egyenlet megoldása lényegesen bonyolultabb formulát eredményezne, mint a korszerű, kerámiaszál bázisú egyrétegű, önhordó falazat. Természetesen ez esetben is az átmeneti függvény a hőmérséklet időbeli változását szimbolizálja:

$$h(t) = T(t).$$

Vizsgálataimat a hőntartási szakaszra, azaz stacioner állapotra nem terjesztettem ki, mivel a hőforgalom közel lineárisnak tekinthető egy bizonyos tűréshatáron belül, a hőmérsékletszabályozási algoritmusban beállított paramétereknek megfelelően.

Modellezésem további tárgyát a lehülési szakasz fogja képezni. A hőntartási, azaz a \sim stacioner állapotot követően az izzított betétről a kemenceharangot leemelve, a rendszert nyitottá téve, önmagára hagyjuk. A kemencére adott egységugrás jelet, mint fűtésrákapcsolást, egy *Dirac-impulzus* $[\delta(t)]$ lefutási periódusával megszüntetem. Az így felvett $y(t)$ görbe azon szakaszát tekintem lehülési szakasznak, ami a függvény maximum pontja utáni exponenciális csökkenést eredményez, ezt az 5. ábra szemlélteti.



$$\tau(\text{III.}) = f(\tau_{\text{hőkezelés}}, m_{\text{betét}}, c_{\text{betét}}, S_{\text{betét}}, \lambda_{\text{betét}}, T_{\text{betét}}, m_{\text{fal}}, c_{\text{fal}}, S_{\text{fal}},$$

$$\lambda_{\text{fal}}, T_{\text{fal}}, T_{\text{környezet}}, \text{konstrukciós kialakítás, áramlási viszonyok})$$

5. ábra A lehülési szakasz exponenciális jelleggörbéjének alakulása

Matematikailag a súlyfüggvény, az átviteli függvényből *inverz Laplace-transzformációval* határozható meg, $x_{be}(t) = \delta(t)$ hatására:

$$y(t) = L^{-1} [Y(s)]$$

$$y(t) = T(t) = L^{-1} [274,5 e^{-st_h} / ((1 + s \tau_1) (1 + s \tau_2))].$$

A felírt egyenlet megoldása a súlyfüggvény, aminek a maximum pontja utáni exponenciális csökkenése a $[T(t)]$ függvénynek felel meg. Részletes számításokat és vizsgálatokat végeztem, villamos ellenállás-fűtésű, 125 mm vastagságú, vákuumformázott kerámiaszál bélésű, laboratóriumi vákuum munkaterű, porcelán hőkezelő kemencén [22, 79, 80].

Számított, mért és ellenőrzött adatok:

- *maximális térhőmérséklet $T_{max} = 1260$ °C;*
- *üzemi hőmérséklet $T_{üzemi} = 980$ °C;*
- *az átlagértékekkel számolva a zárt rendszer holtideje $\tau_h \cong 1$ min;*
- *felfűtési sebesség ~ 50 °C/min;*
- *lehűlési sebesség ~ 60 °C/min (önmagára hagyva);*
- *arányos átviteli tényező $A_p = 212,5$ °C/MJ.*

Vizsgálataim ilyen aspektusból történő megvilágítására azért volt szükség, mert összetettebb rendszerek részletes analízisét, alapátviteli és ezek kombinációiból kialakított tagok összekapcsolásával végezhettem el, jóval drágább kemencefalazat konstrukciók előállítására nélkül [6, 14, 21, 31, 37, 39, 44, 46, 55, 56, 65, 66, 70, 74, 75, 81, 82, 84, 85, 86, 87, 88].

Az időállandók meghatározása (h: harang, l: laboratóriumi):

$$\tau_{1h} = R \cdot C = Q_{fal(köpeny)} / \Phi_{fal(köpeny)ve} = 592,8 \cdot 584 \cdot 803 / 5881,8 \cong 13 \text{ h};$$

$$\tau_{1h} = R \cdot C = Q_{fal(födém)} / \Phi_{fal(födém)ve} = 150,7 \cdot 584 \cdot 808 / 1939 \cong 10,2 \text{ h};$$

$$\tau_{1l} = R \cdot C = Q_{fal(köpeny)} / \Phi_{fal(köpeny)ve} = 5,28 \cdot 584 \cdot 920 / 98 \cong 8,0 \text{ h};$$

$$\tau_{1l} = R \cdot C = Q_{fal(födém)} / \Phi_{fal(födém)ve} = 2,4 \cdot 584 \cdot 896 / 61,4 \cong 5,7 \text{ h}.$$

5. A hőkezelés hőtani alapjai

5.1. A kemencék bélésanyagának hőtani tulajdonságai

Az elmúlt évtizedek kemencekonstrukcióinak korszerűsítésében végbement változások a harangkemencéket is érintették. Ennek legfontosabb jelei a harang bélésanyagának (falazatának) korszerűsítésében, az égők fejlesztésében és levegő-előmelegítő rekuperátorok modernizálásában valósult meg.

A bélésanyag korszerűsítése a hagyományos samott falazattól a mai kerámiaszál alapú szálanyag bélésig sokféle fejlesztési fokozaton esett át. Szükségszerű és elengedhetetlen, az eredmények összehasonlítása érdekében ezen bélésanyagok legfontosabb hőtechnikai jellemzőinek a felelevenítése.

A hagyományos és a korszerű kemence építő, ill. bélésanyagok legjellemzőbb hőtechnikai, fizikai és tervezési paramétereinek ismertetése:

- hagyományos tűzálló anyag T4 samott, 1850 kg/m³ testsűrűség

[λ] W/m°C	0,96	1,05	1,14	1,23	1,33
[T] °C	200	400	600	800	1000

- hagyományos hőszigetelő téglá DVM 1-2, 450 kg/m³ testsűrűség

[λ] W/m°C	0,195	0,203	0,248	0,293	0,338
[T] °C	200	400	600	800	1000

- könnyű tűzálló téglá L 110, 420 kg/m³ testsűrűség

[λ] W/m°C	0,147	0,165	0,190	0,222
[T] °C	200	400	600	800

Korszerű kerámiaszál bázisú falazatszigetelő (kerámiaszálpaplan), ill. önhordó falazatként is alkalmazható vákuumformázott, valamint felszórásos technológiával készült szigetelőanyag és egyben falazat hőtechnikai jellemzői:

- RATH KM 1260 típusú szigetelőpaplan, 128 kg/m³ testsűrűség

[λ] W/m°C	0,03	0,07	0,12	0,18	0,21
[T] °C	200	400	600	800	1000

- RATH KV 1700/400 típusú vákuumformázott falazatidom, 400 kg/m³ testsűrűség

[λ] W/m°C	0,05	0,07	0,09	0,13	0,19
[T] °C	200	400	600	800	1000

- RATH KV 12 LOSE konzisztenciájú kerámiaszálból felszórásos technológiával készült önhordó falazat, 240 kg/m³ testsűrűség

[λ] W/m°C	0,06	0,07	0,09	0,13	0,19
[T] °C	200	400	600	800	1000

Az ismertett anyagok hőtechnikai adataiból egyértelműen kitűnik, hogy a kerámiaszál alapanyagú hőszigetelő, ill. a kerámiaszál bázisú alapanyagból és szerves valamint szervesetlen kötőanyag hozzáadásával készült vákuumformázott és felszórásos technológiával készülő önálló és önhordó falazatidomok, falazatok, béléslemek testsűrűsége lényegesen kisebb, a hagyományos anyagokból készült falazatokkal szemben.

Ebből következően a kemencék bélésanyagainak tömege, átlagosan a hetede a hagyományos anyagokénak [3, 8, 9, 10, 11, 12, 21, 42, 43, 48, 50, 52, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 67, 72, 73, 74, 75, 79, 80, 81, 82].

A fajlagos hőkapacitás értékeit vizsgálva ($T_{\text{átlag}} = 500 \text{ °C}$), arra a számszerű adatra jutunk az átlagértékek figyelembevételével, hogy:

$$c_{\text{fal (hagyományos)}} = 1,13 \text{ kJ/kg°C};$$

$$c_{\text{fal (kerámiaszál)}} = 0,584 \text{ kJ/kg°C}.$$

Ez azt a lényeges gazdasági tényét igazolja, hogy a falazat felmelegítéséhez szükséges entalpia, lényegesen kisebb lesz, kerámiaszál bázisú alapanyagok alkalmazása esetén:

$$Q_{\text{fal (hagyományos)}} = m_{\text{fal (hagyományos)}} \cdot c_{\text{fal (hagyományos)}} \cdot \Delta T_{\text{fal \textit{\'atlag}}}, \text{ kJ};$$

$$Q_{\text{fal (kerámiaszál)}} = m_{\text{fal (kerámiaszál)}} \cdot c_{\text{fal (kerámiaszál)}} \cdot \Delta T_{\text{fal \textit{\'atlag}}}, \text{ kJ};$$

$$Q_{\text{fal (kerámiaszál)}} \ll Q_{\text{fal (hagyományos)}}.$$

Példaként a fenti összefüggést, 1 kg tömegű hagyományos és kerámiaszál anyagra, $T = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékleten megvizsgálva, a következő számszerű adatokhoz jutunk:

$$Q_{\text{fal (hagyományos)}} = 565 \text{ kJ};$$

$$Q_{\text{fal (kerámiaszál)}} = 292 \text{ kJ}.$$

Ezek az adatok egyértelműen bizonyítják, hogy a korszerű tűz-és hőálló anyagok entalpiája $\sim 1,9$ -e a hagyományos anyagokénak.

Konklúzióként vonhatjuk le a fenti tényből, hogy a kemencebélés korszerűsítésének ma járható lehetséges útja, könnyű kis tömegsűrűségű anyagokból történő, energiatakarékos kivitelben történő átépítés.

A 6. ábrán látható fényképek korszerű ACTIVE gyártmányú, tűz-és hőálló kerámiaszál bázisú szigetelőanyagokat ábrázolnak.



Ömlesztett



Paplan



Vákuumformázott

6. ábra ACTIVE gyártmányú kerámiaszál bázisú termékek fényképei

5.2. A harangkemencékben végbemenő hővezetés, konvekció és a hősugárzás jellemzése

A vezetési hőátadás a kemence falfelületének átadott hő útján terjed az anyag belsejébe és onnan az anyag külső felületére. A hőmérséklet gradiens az anyag hővezetési tulajdonságaitól függ, melyet a hővezetési tényező jellemez.

A hővezetés alaptörvényét a *Fourier-egyenlet* fejezi ki, általában stacioner hőállapot esetére. A koordinátarendszer x tengely irányú hőáramát, „s” falrétegvastagsággal jelölve [1, 2, 3, 4]:

$$\Phi = \frac{\lambda (T_{\text{belső}} - T_{\text{külső}})}{s}, \text{ W/m}^2.$$

Többrétegű kemencefalazat esetében a hőáram, a következő összefüggéssel számítható:

$$\Phi = \frac{(T_{\text{belső}} - T_{\text{külső}})}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i}}, \text{ W/m}^2.$$

Az anyagok hővezetési tényezője a hőmérséklettől függ, az egyes anyagok tulajdonsága szerint.

A konvektív hőátadás, a folyékony és a gáznemű tüzelőanyagokkal fűtött kemencék munkatereiben jön létre a füstgáz áramlása és a betétanyag között, valamint a füstgáz és a falazat között, számítása a *Newton-törvény* alapján történik:

$$\Phi = \alpha_k A (T_{\text{belső}} - T_{\text{külső}}), \text{ W}.$$

A hőáram számításában a konvektív hőátadási tényező $\text{W/m}^2\text{K}$ egységű, meghatározása igényes feladat, empirikus egyenletekkel, vagy hasonlósági kritériumok alapján történik, melyek adott körülményekre érvényesek.

Meghatározó szerepet játszik az áramló, hőleadó közeg sebessége, hőmérséklete, sűrűsége, az áramlási tér fő méretei, valamint az áramlás jellegét leíró fő kritériumok.

Gáz-és olajtüzelésű hőkezelő harangkemencék munkatereiben az áramlás általában turbulens a jobb hőátadási viszonyok érdekében. A füstgáz és a szilárd anyagfelület közötti konvektív hőátadási tényezőt a következő empirikus összefüggéssel számíthatjuk [1, 2, 3, 4]:

$$\alpha_k = [6,3 + 0,0052(T_{\text{fsg}} - 273)] w^{0,8} / D^{0,2}, \text{ W/m}^2\text{K}.$$

Villamos ellenállás-fűtésű harangkemencék munkatereiben gyakorlatilag áramlást nem tételezünk fel, így a konvektív hőátadási tényező értékét az összesített hőátadás számításánál nem kell figyelembe vennünk.

Bizonyos áramlási kritériumokhoz kötött számítási formulákhoz, ami a laminaritást, ill. a turbulenciát dönti el, a **Reynolds-számot** használjuk, ami egység nélküli [1, 2, 3, 4]:

$$\text{Re} = (w D) / \nu.$$

A betűk jelentése a következő:

[w]:áramlási sebesség, m/s;
 [ν]:kinematikai viszkozitás, m²/s;
 [D]:hidraulikus átmérő, m.

A konvekciós hőátadási szám meghatározásához a **Nusselt-számból** indulunk ki, mely szintén egység nélküli [1, 2, 3, 4]:

$$\text{Nu} = (\alpha_k D) / \lambda.$$

A betűk a jelentése a következő:

[α_k]:konvektív hőátadási tényező, W/m²K;
 [λ]:a gáz hővezetési tényezője, W/mK;
 [D]:hidraulikus átmérő, m.

A **Prandtl-szám** az áramló közeg dinamikus jellemzőit, a hőtechnikai jellemzőkkel kapcsolja össze [1, 2, 3, 4]:

$$Pr = (w c \rho) / \lambda.$$

A betűk jelentése a következő:

[c]: fajlagos hőkapacitás, kJ/kg°C;

[ρ]: sűrűség, kg/m³.

A kemencék építőanyagai szürke testeknek tekinthetők, vagyis a ráeső hősugarak egy részét elnyelik, más részét kisugározzák, az abszolút fekete testekkel szemben, melyek az összes ráeső sugarat elnyelik, a **Planck-törvény** értelmében.

Folyékony tüzelőanyag ill. gáztüzelés esetén, a betétre irányuló szürkésugárzás a láng és a falazat sugárzásából áll. Teljes hullámhossz tartományban lejátszódik, ellentétben a színes sugárzással (füstgázugárzás).

A szürkésugárzást az emissziós tényezővel (feketeségi fok) vesszük figyelembe, ami egység nélküli szám.

A szürketest, valamint a láng hősugárzásának a számítását, a műszaki gyakorlatban a **Stefan-Boltzmann** összefüggéssel számíthatjuk [1, 3, 4]:

$$\Phi = \varepsilon C A [(T_{\text{belső}} / 100)^4 - (T_{\text{külső}} / 100)^4], W.$$

Az egyenlet betűinek a jelentése a következő:

[ε]: emissziós tényező, egység nélküli;

[C]: sugárzási szám, W/m²K⁴;

[A]: felület, m².

A gázok (füstgáz-vagy színessugárzás) szelektív sugárzók, mivel csak a többatomos gázok sugároznak, sugárzásuk nem teljes, hanem csak meghatározott hullámhossz-tartományban, sávokban játszódnak le. Ezek a sávok a színek különböző részein helyezkednek el.

A kohászati kemencék munkatereiben jelen lévő füstgáz két égéstermék komponense, a CO₂ és a vízgőz sugároz.

A szelektív sugárzás alaptörvényszerűségeit *Hottel* és *Egbert* dolgozták ki [1, 2, 3, 4].

A sugárzás alapegyenleteinek kidolgozásakor félgömb alakú testet vettek figyelembe, mivel a kemencék eltérő alakúak, ezért a korrekciós tényező:

$$k = s / D, \text{ egység nélküli, ahol;}$$

[s]:falvastagság, m;

[D]:átmérő, m.

Természetesen villamos ellenállás-fűtésű harangkemencék esetében a füstgáz szelektív sugárzását nem kell figyelembe vennünk, a számítások esetében az összesített hőátadási tényezővel kell dolgoznunk, ahol α_k konvekciós hőátadási tényező elhanyagolható:

$$\alpha_{\text{összesített}} = \alpha_{\text{konvekciós}} + \alpha_{\text{sugárzó}}, \text{ W/m}^2\text{K.}$$

A kohászati kemencék munkatereiben létrejövő hőcsere folyamat az egyes hőátadási folyamatok együttes hatásaként adódik. Ezért az összesített, vagy a teljes hőátadás számításában, valamennyi hőátadási típust figyelembe vesszük az egyes tételek összegzése alapján.

Jelen feladatunk számításához, analizálásához egy függőleges irányban mozgatható, szakaszos üzemű harangkemence stacioner állapotban lévő falazatvesztésének, energiaigényének a meghatározásához figyelembe kell vennünk a födém ill. az oldalfalazat vesztését.

Az „n” rétegszámú síkfal (harangkemence födém) esetében a hőáram stacioner állapotban a következő összefüggéssel számítható [1, 2, 3, 4]:

$$\Phi = k \cdot A \cdot (T_{\text{belső}} - T_{\text{külső}}), \text{ W.}$$

Az egyenletben szereplő „k” hőátbocsátási tényező értékét, az alábbiakban megadottak szerint számíthatjuk:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_b} + \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_k}}, \text{ W/m}^2\text{K.}$$

Az egyenlet jelölései a következők:

[s_i]: az i -edik falazatelem vastagsága, m;

[λ_i]: az i -edik falazatelem hővezetési tényezője, W/mK;

[α_b]: belső hőátadási tényező, W/m²K;

[α_k]: külső hőátadási tényező, W/m²K;

[A]: felület, m².

Az „ n ” rétegszámú hengeres fal (harangkemence oldalfalazat) esetében, stacioner állapotban a hőáram az alábbi összefüggéssel számítható [1, 3, 4]:

$$\Phi = \frac{\pi \cdot h \cdot (T_{\text{belső}} - T_{\text{külső}})}{\frac{1}{\alpha_b D_{\text{belső}}} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{D_{i+1}}{D_i} + \frac{1}{\alpha_k D_{\text{külső}}}}, \text{ W/m.}$$

Az egyenletben szereplő jelölések:

[h]: a hengeres falazat magassága, m;

[D_i]: az i -edik réteg átmérője, m.

Ebben a fejezetben ismertetett törvények, egyenletek megfelelő alkalmazásával, tudunk korrekt módon kemencefalazatot tervezni, méretezni, valamint az elkészült bélésanyagok részletes hőtechnikai vizsgálatát elvégezni.

5.3. A hővezetési tényező szerepe, meghatározásának számítógépes modellezése

A különböző anyagok hővezetési tényezői, szigorúan hőmérsékletfüggőek, a számítandó hőáram a hővezetés *Fourier-egyenletéből* határozható meg [1, 2, 3, 4]:

$$\Phi = [\lambda \cdot A \cdot (T_{\text{belső}} - T_{\text{fal}})] / s, \text{ W.}$$

Tételezzük fel, hogy egy kemence térhőmérséklete 1000 °C. Az érintésvédelmi előírásokat betartva, egy egyrétegű kerámiaszál bázisú alapanyagból készült önhordó, vákuumformázott falazat külső falhőmérséklete, $T_{\text{fal}} = 60$ °C. A kiindulási és a számított köpenyhőmérséklet átlaga, $T_a = 1060 / 2 = 530$ °C. A falazatveszteség pontos számításához, természetesen ezen a T_a átlaghőmérsékleten kell a hővezetési tényező értékét meghatároznunk.

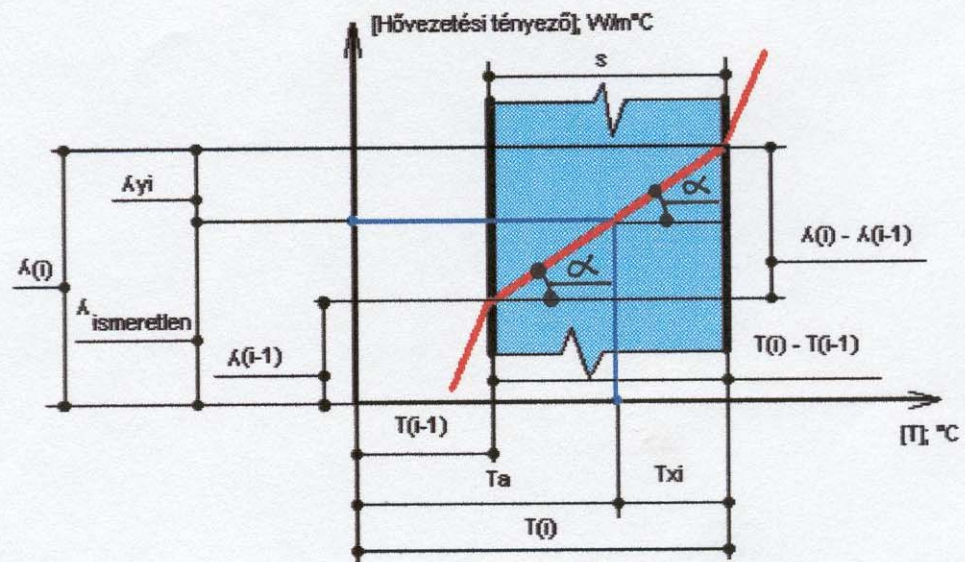
Konkrét laboratóriumi méréseket, vizsgálatokat végeztem, RATH KV-12 gyártmányú, LOSE (ömlesztett) konzisztenciájú, kerámiaszál alapanyagból készített vákuumformázott, $\sim 240 \text{ kg/m}^3$ látszólagos tömegsűrűséggel kivitelezett kemencefalazat esetében, villamos ellenállás-fűtés esetére [8, 22, 79, 80, 81, 82]. A kemence külső falhőmérséklete $T_{\text{fal}} = 61,2$ °C-ra adódott, $s = 125$ mm falvastagság és $T_{\text{max}} = 1200$ °C maximális térhőmérséklet esetében. Ebben az esetben a $T_a = 1261,2 / 2 \cong 631$ °C-ra adódott. A számítás pontossága érdekében, ezen a számított T_a átlaghőmérsékleten kellett a hővezetési tényező értékét meghatároznom, az alábbiakban ismertetendő eljárással.

A gyártó a tervezési és a számítási segédletben, nem közli a hővezetési tényező értékét ezen a hőmérsékleten, adott viszont a 600 °C és a 800 °C-hoz tartozó hővezetési tényező értéke [8]:

$[\lambda]$ W/m°C	0,09	0,13
$[T]$ °C	600	800

A keresett hővezetési tényező értékét, a matematikából jól ismert *szukcesszív approximációs* közelítő módszerrel határoztam meg. Amennyiben a 600 °C és a 800 °C hőmérsékleti intervallumhoz tartozó hővezetési tényező értékeit, egy lineáris szakasszal közelítem, úgy az

alábbiakban ismertető módon, jó információt kapunk a T_a számított átlaghőmérsékletéhez tartozó hővezetési tényező értékéről 7. ábra.



7. ábra Az ismeretlen hővezetési tényező meghatározása

A 7. ábrán jól látható a vizsgált hőmérsékleti intervallumban elhelyezkedő két azonos meredekséggel rendelkező hasonló, derékszögű háromszög, melyek iránytangense:

$$\operatorname{tg} \alpha = (0,13 - 0,09) / (800 - 600) = 0,0002.$$

A keresett 631 °C-on a kisebbik hasonló derékszögű háromszög szöggel szemközti befogója:

$$T_{xi} = 800 - 631 = 169 \text{ °C}$$

hőmérséklet különbségre adódik.

Azonos iránymeredekséggel számolva, a derékszögű háromszög másik befogója:

$$\lambda_{yi} = T_{xi} \cdot \operatorname{tg} \alpha = 169 \cdot 0,0002 = 0,0338 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}.$$

A számított $T_a = 631 \text{ °C}$ átlaghőmérsékleten az ismeretlen hővezetési tényező értéke:

$$\lambda_{ismeretlen} = 0,13 - 0,0338 = 0,0962 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}.$$

A fentebb ismertetet számítási eljárást, SIBRAL alapanyagból, 240 kg/m³ látszólagos tömegsűrűséggel kivitelezett, felszört technológiával készült falazat esetére is elvégeztem („Hámor Rt.” harangkemence).

A számítási módszer hitelességét úgy vizsgáltam, hogy a hőmérsékletet 50 °C-os lépcsőkben növeltem, mértem a térhőmérsékletet és a köpenyhőmérsékletet NiCr-Ni hőelemmel, az ellenőrzés analóg mutató °C mérő műszerrel történt, valamint a köpenyhőmérsékletet pedig tapintó hőmérővel ellenőriztem. Az adatokból $A = 1 \text{ m}^2$ felületre és $s = 0,14 \text{ m}$ falvastagság esetére meghatároztam a hőáramokat, majd ezt követően a hővezetési tényező értékeit kiszámítottam. Eltérést, csupán csak a második tizedes jegyben találtam, ami a felállított matematikai modellem helyességét támasztotta alá.

Ezt követően, a felállított hőtani és matematikai modellem alapján, a számítás meggyorsítása érdekében, az alábbiakban ismertetésre kerülő

módon algoritmizáltam, a T_a átlaghőmérsékleten meghatározandó hővezetési tényező számítási módszerét.

A termodinamika II. főtétele értelmében, a hő önként mindig a nagyobb hőmérsékletű helyről áramlik át a kisebb hőmérsékletű hely felé. A szilárd testek belsejében a hőáram a **Fourier-féle hővezetési törvény** alapján határozható meg [4]:

$$\Phi = - \lambda \text{ grad } (T).$$

Egyszerűsített egydimenziós hővezetést feltételezve jutunk el, az energia-egyenlet legáltalánosabb alakjához, az un. **Fourier-Kirchoff** parciális differenciál egyenlethez [4]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{\partial T}{\partial x} w_x = \frac{\lambda}{c \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right).$$

A hővezetési folyamat stacioner állapotú megoldása esetén, a parciális differenciál egyenlet időtől függő tagja zérus:

$$\partial T / \partial \tau = 0.$$

Egydimenziós hővezetést feltételezve, síkszelvény esetére a következő differenciál egyenlethez jutunk:

$$\partial^2 T / \partial x^2 = 0.$$

Az egyenlet megoldása:

$$T = C_0 + C_1 x,$$

ahol C_0 és C_1 integrálási állandók.

Az egyenlet állandói az $x = 0$ és az $x = s$ helyzetekhez tartozó T_b és T_{fal} hőmérsékleti értékek behelyettesítésével a:

$$C_0 = T_a = (T_b + T_{fal}) / 2;$$

$$C_1 = - (\alpha_b / \lambda) (T_{\text{térhőmérséklet}} - T_b)$$

meghatározhatók.

Legyenek adottak i elemszámú hőmérsékleti értékekhez tartozó, i elemszámú hővezetési tényezők adatai (i : pozitív egész szám).

Tegyük fel, hogy az adott hőmérsékleti pontok között, egydimenziós hővezetést feltételezve, síkszelvény esetére, jó közelítéssel lineáris jelleget mutat a hővezetési tényező.

Stacioner állapotban a kemencefalazatban síkszelvény esetében, a hőmérséklet lefutása lineáris.

A számított T_a átlaghőmérsékletnek, a

$$T_{(i-1)} = < T_a <= T_{(i)}$$

hőmérsékleti intervallumok közé kell esnie, akkor az iránytangens a következő módon számítható:

$$\text{tg } \alpha = [(\lambda_{(i)} - \lambda_{(i-1)})] / [(T_{(i)} - T_{(i-1)})].$$

A keresett T_a átlaghőmérséklethez tartozó T_{xi} a következő egyenlettel számítható:

$$T_{xi} = T_{(i)} - T_a;$$

majd a

$$\lambda_{yi} = T_{xi} \cdot \text{tg } \alpha$$

alakú lesz.

A fenti levezetésekéből adódóan, a T_a számított átlaghőmérséklethez tartozó hővezetési tényező értékét a:

$$\lambda_{\text{ismeretlen}} = \lambda_{(i)} - \lambda_{yi}$$

összefüggéssel határoztam meg.

A fentiekben ismertetett számítási algoritmusra, **grafikon.exe** néven, **Turbo Pascal 6.0** nyelven, grafikus megjelenítésű számítógépes szoftvert készítettem azért, hogy a bélésanyag vastagságának a meghatározása minél pontosabb értékű legyen, hiszen a korszerű kerámiaszál bázisú falazat ill. szigetelőanyagok hővezetési tényező értékei, adott hőmérsékleti intervallumokon belül, csak nagyon kis eltérést mutatnak.

Ebből következik, hogy ez elengedhetetlen a minél pontosabb energia-bevitel, ill. az energia-megtakarítás és a gazdasági számítások meghatározása érdekében [21, 22, 32, 33, 34, 35, 36, 42, 48, 50, 55, 56, 57, 60, 61, 62, 63, 64, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 79, 80, 81, 82, 90].

Az 1-es számú mellékletben található lemezen lévő **grafikon.exe** file indítható a DOS-ból.

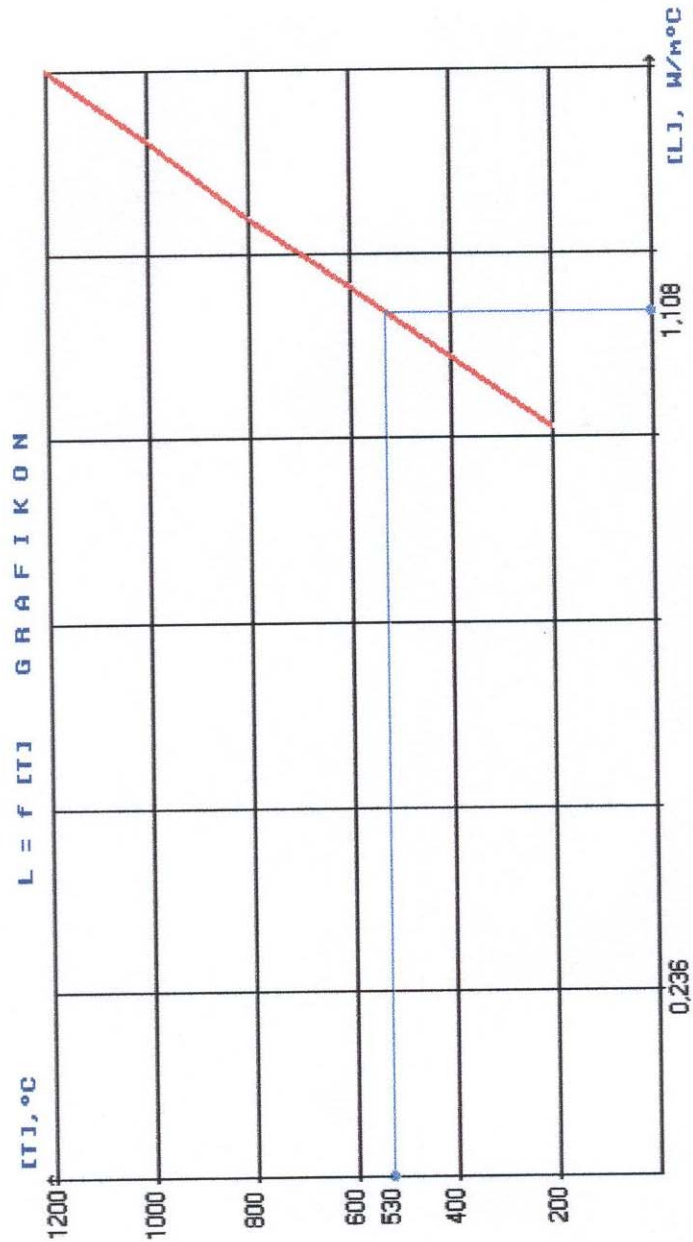
A 8. a). és a 8. b). ábrákon számítógéppel modellezett hővezetési tényezők értékeinek a meghatározása látható, azonos T_a számított átlaghőmérséklet esetére, különböző típusú hőálló anyagokra vonatkozóan.

Hardver követelmények:

- **IBM PC AT kompatibilis személyi számítógép;**
- **Szükséges minimális konfiguráció: INTEL 80486 DX4 processzor, 16 MB RAM, 3.5"-os floppy driver, VGA videó kártya és monitor.**

Szoftver követelmények:

- **MS-DOS operációs rendszer 6.22 verzió;**
- **Turbo Pascal 6.0 megfelelően telepítve;**
- **Windows 95 operációs rendszer.**



A számolt átlaghőmérséklet $^{\circ}\text{C} = 530$

A számolt hővezetési tényező $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C} = 1.108500000000\text{E}+00$

Anyagminőség: Samott T4, 1850 kg/m^3

8. a). ábra Számítógéppel modellezett hővezetési tényező meghatározása

50 a).



A számolt átlaghőmérséklet °C = 530

A számolt hővezetési tényező $W/m^{\circ}C = 8.300000000000000E-02$

Anyagminőség: RATH KU 12, 240 kg/m³

8. b). ábra Számítógéppel modellezett hővezetési tényező meghatározása

5.4. Különböző falszerkezetű kemencék tűzálló bélésének számítógépes modellezése

A korrekt hőárammérleg számításához, ill. méréséhez, a „Hámor Rt.”-ben működő villamos ellenállás-fűtésű 2430 mm külső átmérőjű hőkezelő harangkemence adatait vettem kiindulási alapként. A falazatkonstrukció számítását számítógépre írt iterációs program segítette, ami grafikus megjelenítéssel is ábrázolja a hagyományos és a korszerű felszört technológiával készült falazatok méretarányos kialakítását. A hengeres palást méretezésére egy régebben írt szoftverem szolgált, eredményeit az 1-es számú mellékletben található printerlapok tartalmazzák. A síkfalú földém méretezését viszont, egy teljesen új, általam kidolgozott komplett hőtechnikai számítási szoftverrendszer segítette.

- Szálkerámiás bélésű harangkemence kiinduló adatai:

- térhőmérséklet, $T_b = 850 \text{ °C}$;
- külső hőmérséklet a mérés idején, $T_k = -1 \text{ °C}$;
- a kemence belső átmérője, $D_b = 2110 \text{ mm}$;
- a szört falazat külső átmérője, $D_k = 2390 \text{ mm}$;
- a kemence magassága, $h = 2500 \text{ mm}$;
- a földém szört falazatának vastagsága, $h_1 = 140 \text{ mm}$.

- Hagományos (samott-thermolit) bélésű harangkemence kiinduló adatai:

- a samott falazat belső átmérője, $D_1 = 1960 \text{ mm}$;
 - a kemence samott falazatának külső átmérője, $D_2 = 2210 \text{ mm}$;
 - a hőszigetelő thermolit falazat külső átmérője, $D_3 = 2370 \text{ mm}$;
 - a földém samott falazatának vastagsága, $h_2 = 125 \text{ mm}$;
 - a földém thermolit rétegének vastagsága, $h_3 = 65 \text{ mm}$;
 - az izzítandó betét megnevezése, vasúti kerékabroncs;
 - betét tömege, 4500 kg;
- az acél fajlagos hőkapacitása 800 °C -on, $0,657 \text{ kJ/kg°C}$.

A szálkerámiás bélésű harangkemence hőárammérlegének számítása

A betét felmelegítéséhez szükséges entalpia:

$$Q_{\text{betét}} = m_{\text{betét}} \cdot c_{\text{betét}} \cdot (T_{\text{betét vég}} - T_{\text{betét kezdet}}), \text{ kJ};$$

$$Q_{\text{betét}} = 4500 \cdot 0,657 \cdot 851 = 2515981 \text{ kJ}.$$

A szórt falazat térfogata (köpeny):

$$V = [(D_k^2 \pi/4) - D_b^2 \pi/4] \cdot h, \text{ m}^3;$$

$$V = [(2,39^2 \pi/4) - (2,11^2 \pi/4)] \cdot 2,5 = 2,47 \text{ m}^3.$$

A szórt falazat tömege (köpeny), 240 kg/m^3 látszólagos tömegsűrűséggel számolva:

$$m_{\text{fal (köpeny)}} = 240 \cdot 2,47 = 592,8 \text{ kg}.$$

A szórt falazat felmelegítéséhez szükséges entalpia (köpeny):

$$Q_{\text{fal (köpeny)}} = m_{\text{fal (köpeny)}} \cdot c_{\text{fal (köpeny)}} \cdot (T_{\text{fal (köpeny) belső}} - T_{\text{fal (köpeny) külső}}), \text{ kJ};$$

$$Q_{\text{fal (köpeny)}} = 592,8 \cdot 0,584 \cdot (850 - 47) = 277994,7 \text{ kJ}.$$

A szórt falazat térfogata (födém):

$$V = (D_k^2 \pi/4) \cdot h_1, \text{ m}^3;$$

$$V = (2,39^2 \pi/4) \cdot 0,14 = 0,628 \text{ m}^3.$$

A szórt falazat tömege (födém):

$$m_{\text{fal (födém)}} = 0,628 \cdot 240 = 150,7 \text{ kg}.$$

A szórt falazat (födém) felmelegítéséhez szükséges entalpia:

$$Q_{\text{fal (födém)}} = m_{\text{fal (födém)}} \cdot c_{\text{fal (födém)}} \cdot (T_{\text{fal (födém) belső}} - T_{\text{fal (födém) külső}}), \text{ kJ};$$

$$Q_{\text{fal (födém)}} = 150,7 \cdot 0,584 \cdot (850 - 42) = 71111,1 \text{ kJ}.$$

Külső hőátadási tényezők meghatározása

Hőálló, alumínium festéssel bevont, függőleges kemence-páncéllemez esetére alkalmazható empirikus egyenlet [1, 2, 3]:

$$\alpha_{\text{külső (köpeny)}} = 6,28 + 0,4 \cdot T, \text{ kJ/m}^2\text{s}^\circ\text{C};$$

$$\alpha_{\text{külső (köpeny)}} = 6,28 + 0,4 \cdot 47 = 25,08 \text{ kJ/m}^2\text{s}^\circ\text{C}.$$

Hőálló, alumínium festéssel bevont, vízszintes kemence-páncéllemez esetére alkalmazható empirikus egyenlet [1, 2, 3]:

$$\alpha_{\text{külső (födém)}} = 8,6 + 0,4 \cdot T, \text{ kJ/m}^2\text{s}^\circ\text{C};$$

$$\alpha_{\text{külső (födém)}} = 8,6 + 0,4 \cdot 42 = 25,4 \text{ kJ/m}^2\text{s}^\circ\text{C}.$$

A harangkemence falazatvesztését (köpeny és födém), egy általam régebben készített, grafikus vizualizációval is rendelkező szoftverrendszerrel határoztam meg, az 1990-es évek számítástechnikai lehetőségeit felhasználva.

Az alábbiakban feltüntetett adatok hitelessége, az 1-es számú melléklet printerlapjain ellenőrizhetők.

A szórt falazatú harangkemence falazatvesztése:

$$\Phi_{\text{fal (köpeny) ve fajlagos}} = 2352,7 \text{ W/m};$$

$$\Phi_{\text{fal (köpeny) ve teljes}} = 5881,8 \text{ W};$$

$$\Phi_{\text{fal (födém) ve fajlagos}} = 432,7 \text{ W/m}^2;$$

$$\Phi_{\text{fal (födém) ve teljes}} = 1939 \text{ W}.$$

A szórt falazatú harangkemence köpenyhőmérséklete:

$$T_{\text{fal (köpeny)}} = 47 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$T_{\text{fal (födém)}} = 42 \text{ }^\circ\text{C}.$$

A szórt falazatú harangkemence teljes entalpiaigénye:

$$Q_{\text{teljes}} = Q_{\text{betét}} + Q_{\text{fal (köpeny)}} + Q_{\text{fal (födém)}} + Q_{\text{fal (köpeny) ve}} + Q_{\text{fal (födém) ve}}, \text{ GJ.}$$

A harangkemence köpeny-és födémszerkezetére vonatkozó teljes falazatveszteség meghatározása, a tényleges 8 h-ás hőkezelési ciklusra vetítve történt meg.

Indulás: 12 h 35 perc

Leállítás: 20 h 40 perc

Műszerbeállítás: 5 perc

A szórt harangkemence falazatveszteségének a meghatározása, 8 h-ás hőkezelési ciklusra vonatkoztatva:

$$\Phi_{\text{fal (köpeny) ve teljes}} \cdot 8 = 5881,8 \cdot 8 = 47054 \text{ Wh};$$

$$\Phi_{\text{fal (födém) ve teljes}} \cdot 8 = 1939 \cdot 8 = 15512 \text{ Wh};$$

$$\Phi_{\text{fal (köpeny) ve teljes}} = 47054 \cdot 3,6 = 169394 \text{ kJ};$$

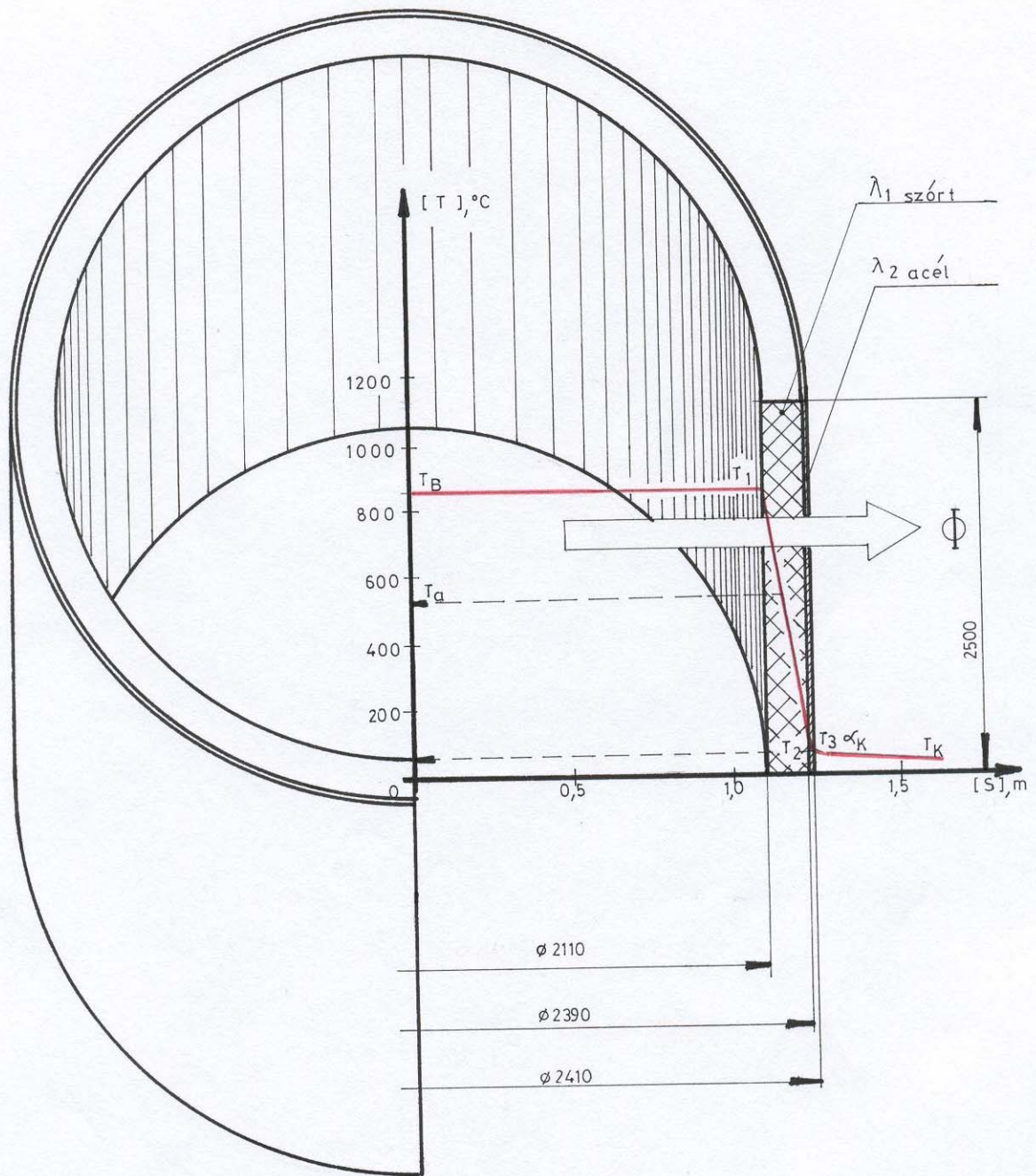
$$\Phi_{\text{fal (födém) ve teljes}} = 15512 \cdot 3,6 = 55843 \text{ kJ.}$$

A szórt falazatú harangkemence teljes entalpiaigénye:

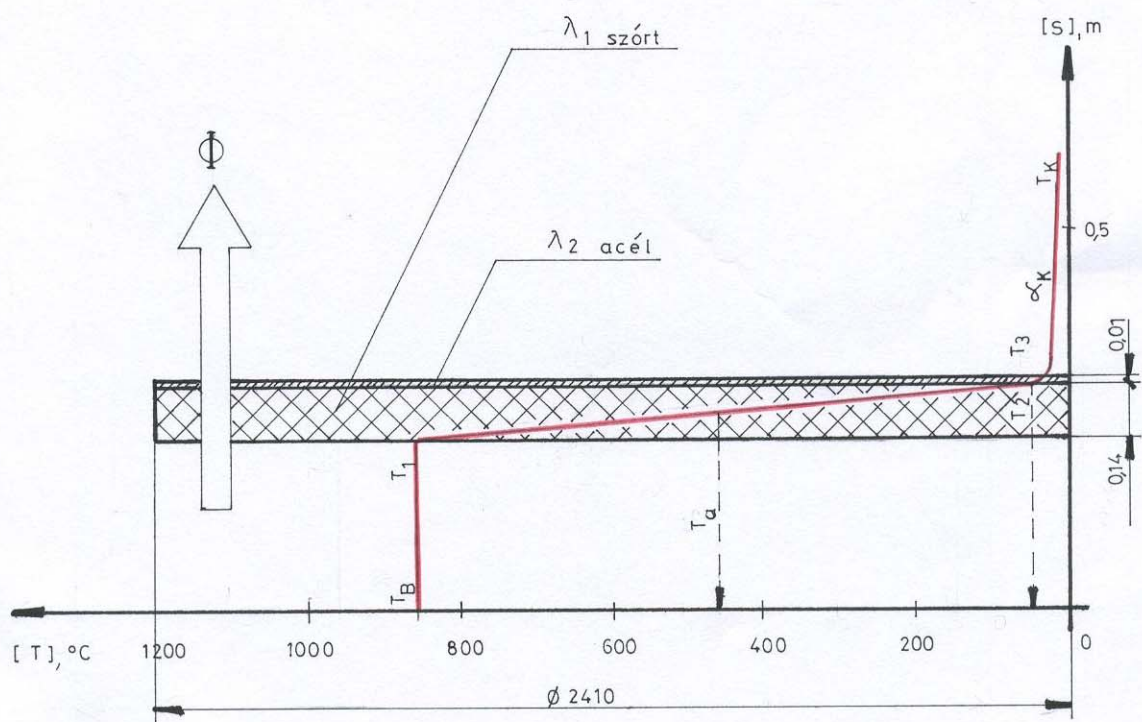
$$Q_{\text{teljes}} = 2515981 + 277994,7 + 71111,1 + 169394 + 55843 = 3090328,8 \text{ kJ};$$

$$P_{\text{vill}} \cong 861 \text{ kWh.}$$

A felszórásos technológiával készült harangkemence köpeny-és födémszerkezetének a hőmérséklet lefutási jelleggörbéinek alakulását, a 9. és a 10. ábrák illusztrálják.



9. ábra Hőmérséklet lefutási jelleggörbe, a harangkemence köpenyszerkezetében



10. ábra Hőmérséklet lefutási jelleggörbe, a harangkemence fődémszerkezetében

A hagyományos bélésű harangkemence hőárammérlegének számítása

A betét felmelegítéséhez szükséges entalpia megegyezik az $m = 4500$ kg, a $c = 0,657$ kJ/kg°C és a $\Delta T = 851$ °C kiinduló adatokhoz tartozó:

$$Q_{\text{betét}} = 2515981 \text{ kJ entalpia értékkel.}$$

A samott falazat térfogata (köpeny):

$$V = [(D_2^2 \pi/4) - (D_1^2 \pi/4)] \cdot h, \text{ m}^3;$$

$$V = [(2,21^2 \pi/4) - (1,96^2 \pi/4)] \cdot 2,5 = 2,033 \text{ m}^3.$$

A samott falazat tömege (köpeny), 1850 kg/m³ tömegsűrűséggel számolva:

$$m_{\text{samott (köpeny)}} = 1850 \cdot 2,033 = 3761 \text{ kg.}$$

A thermolit hőszigetelő falazat térfogata (köpeny):

$$V = [(D_3^2 \pi/4) - (D_2^2 \pi/4)] \cdot h, \text{ m}^3;$$

$$V = [(2,37^2 \pi/4) - (2,21^2 \pi/4)] \cdot 2,5 = 1,43 \text{ m}^3.$$

A thermolit hőszigetelő falazat (köpeny) tömege, 450 kg/m³ tömegsűrűséggel számolva:

$$m_{\text{thermolit (köpeny)}} = 450 \cdot 1,43 = 643,5 \text{ kg.}$$

A samott falazat felmelegítéséhez szükséges entalpia (köpeny):

$$Q_{\text{fal (köpeny)}} = m_{\text{samott (köpeny)}} \cdot c_{\text{fal (köpeny)}} \cdot (T_{\text{fal (köpeny) belső}} - T_{\text{fal (köpeny) külső}}), \text{ kJ};$$

$$Q_{\text{fal (köpeny)}} = 3761 \cdot 1,06 \cdot 800 = 3189328 \text{ kJ.}$$

A thermolit hőszigetelő falazat felmelegítéséhez szükséges entalpia (köpeny):

$$Q_{\text{fal (köpeny)}} = m_{\text{thermolit (köpeny)}} \cdot c_{\text{fal (köpeny)}} \cdot (T_{\text{fal (köpeny) belső}} - T_{\text{fal (köpeny) külső}}), \text{ kJ};$$

$$Q_{\text{fal (köpeny)}} = 643,5 \cdot 0,8 \cdot 400 = 205920 \text{ kJ.}$$

A samott falazat térfogata (födém):

$$V = (D_3^2 \pi/4) \cdot h_2, \text{ m}^3;$$

$$V = (2,37^2 \pi/4) \cdot 0,125 = 0,55 \text{ m}^3.$$

A thermolit hőszigetelő falazat térfogata (födém):

$$V = (D_3^2 \pi/4) \cdot h_2, \text{ m}^3;$$

$$V = (2,37^2 \pi/4) \cdot 0,065 = 0,28 \text{ m}^3.$$

A samott falazat tömege (födém), 1850 kg/m³ tömegsűrűséggel számolva:

$$m_{\text{samott (födém)}} = 1850 \cdot 0,55 = 1018 \text{ kg.}$$

A thermolit hőszigetelő falazat tömege (födém), 450 kg/m³ tömegsűrűséggel számolva:

$$m_{\text{thermolit (födém)}} = 450 \cdot 0,28 = 126 \text{ kg.}$$

A samott falazat felmelegítéséhez szükséges entalpia (födém):

$$Q_{\text{fal (födém)}} = m_{\text{samott (födém)}} \cdot c_{\text{fal (födém)}} \cdot (T_{\text{fal (födém) belső}} - T_{\text{fal (födém) külső}}), \text{ kJ};$$

$$Q_{\text{fal (födém)}} = 1018 \cdot 1,06 \cdot 800 = 863264 \text{ kJ.}$$

A thermolit hőszigetelő falazat felmelegítéséhez szükséges entalpia (födém):

$$Q_{\text{fal (födém)}} = m_{\text{thermolit (födém)}} \cdot c_{\text{fal (födém)}} \cdot (T_{\text{fal (födém) belső}} - T_{\text{fal (födém) külső}}), \text{ kJ};$$

$$Q_{\text{fal (födém)}} = 126 \cdot 0,8 \cdot 400 = 40320 \text{ kJ.}$$

A külső hőátadási tényezők (köpeny, födém) értékeit megegyezőnek kell tekintenünk, az azonos külső áramlási viszonyok alkalmazása mellett, a szórt falazat falazatvesztésének számításakor felhasznált adatokéval.

A hagyományos falazatú harangkemence falazatvesztésének (köpeny, födém) a számítása, ugyanazokkal a szoftverekkel készült, mint a

szórt falazatú harangkemence ilyen irányú adatainak a meghatározása. Az 1-es számú mellékletben szereplő printerlapokon az alábbi eredmények ellenőrizhetők.

A hagyományos falazatú harangkemence falazatvesztesége:

$$\Phi_{\text{fal (köpeny) ve fajlagos}} = 7487,4 \text{ W/m};$$

$$\Phi_{\text{fal (köpeny) ve teljes}} = 18718,5 \text{ W};$$

$$\Phi_{\text{fal (födém) ve fajlagos}} = 1274,6 \text{ W/m}^2;$$

$$\Phi_{\text{fal (födém) teljes}} = 5620,9 \text{ W}.$$

A hagyományos falazatú harangkemence köpenyhőmérséklete:

$$T_{\text{fal (köpeny)}} = 120 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$T_{\text{fal (födém)}} = 115 \text{ }^\circ\text{C}.$$

A hagyományos falazatú harangkemence teljes entalpiaigénye:

$$Q_{\text{teljes}} = Q_{\text{betét}} + Q_{\text{fal (köpeny) samott}} + Q_{\text{fal (köpeny) thermolit}} + Q_{\text{fal (födém) samott}} + \\ + Q_{\text{fal (födém) thermolit}} + Q_{\text{fal (köpeny) ve teljes}} + Q_{\text{fal (födém) ve teljes}}, \text{ GJ}.$$

A harangkemence köpeny-és födémszerkezetre vonatkozó teljes falazatveszteségének a meghatározása, a tényleges 12 h 55 perc hőkezelési ciklusra vetítve történt meg.

Indulás: 12 h 35 perc

Leállítás: 1 h 30 perc (éjjel)

A hagyományos falazatú harangkemence falazatveszteségének a meghatározása, 12 h 55 perces hőkezelési ciklusra vonatkoztatva:

$$\Phi_{\text{fal (köpeny) ve teljes}} \cdot 12,9 = 18718,5 \cdot 12,9 = 241468,7 \text{ Wh};$$

$$\Phi_{\text{fal (födém) ve teljes}} \cdot 12,9 = 5620,9 \cdot 12,9 = 72509,6 \text{ Wh};$$

$$\Phi_{\text{fal (köpeny) ve teljes}} = 241468,7 \cdot 3,6 = 869287 \text{ kJ};$$

$$\Phi_{\text{fal (födém) ve teljes}} = 72509,6 \cdot 3,6 = 261035 \text{ kJ}.$$

A hagyományos falazatú harangkemence teljes entalpiaigénye:

$$Q_{\text{teljes}} = 2515981 + 3189328 + 205920 + 863264 + 40320 + 869287 +$$

$$+ 261035 = 7945135 \text{ kJ};$$

$$P_{\text{vill}} \cong 2206 \text{ kWh}.$$

A százalékos energia különbség, a korszerű szórt falazatú és a hagyományos (samott-thermolit) falazatkonstrukcióval szemben ~ 60,7 %-ot eredményezett.

Ez a jelentős mértékű energia-megtakarítás, igen figyelemre méltó eredmény, amikor napjainkra sajnos tartósan jellemző, az energiahordozók árainak rohamos és nagyarányú növekedése.

A falazatveszteség többszöri iterációs számítási, nehézségi és pontossági meghatározási problémáinak a megoldása és meggyorsítása érdekében, kidolgoztam egy komplett hőtechnikai számítási módszert, stacioner esetre, síkmetszet, ill. síkfalal határolt kemencék esetére.

A számítási módszer felhasználja, az 5.3. fejezetben részletesen kidolgozott és ismertetett $\lambda_{\text{ismeretlen}}$ hővezetési tényező számítását, T_a számított átlaghőmérsékleten.

Ezt a számítási módszert legcélszerűbb alkalmazni a tervezés fázisára, de mindenképpen alkalmas, a már meglévő berendezések komplett hőtechnikai ellenőrzésére, ill. felülvizsgálatára.

Ez az újszerű módszer, az adott kiindulási paraméterek pontos megadása után, meghatározza „n” rétegszámból álló falazatkonstrukció esetére stacioner állapotban, síkfalal határolt testek figyelembevételével, az alábbi kiszámítandó adatok:

- $[k]$: hőátbocsátási tényező, $W/m^2 \text{ } ^\circ C$;
- $[\Phi_{fajj}]$: hőáramsűrűség, W/m^2 ;
- $[\Phi_{teljes}]$: teljes hőáram, W ;
- $[T_0 \dots T_{n+1}]$: réteghőmérsékletek, $^\circ C$;
- $[T_{a0} \dots T_{an}]$: átlaghőmérsékletek, $^\circ C$;
- $[\lambda_{a0} \dots \lambda_{an}]$: hővezetési tényezők, $W/m \text{ } ^\circ C$

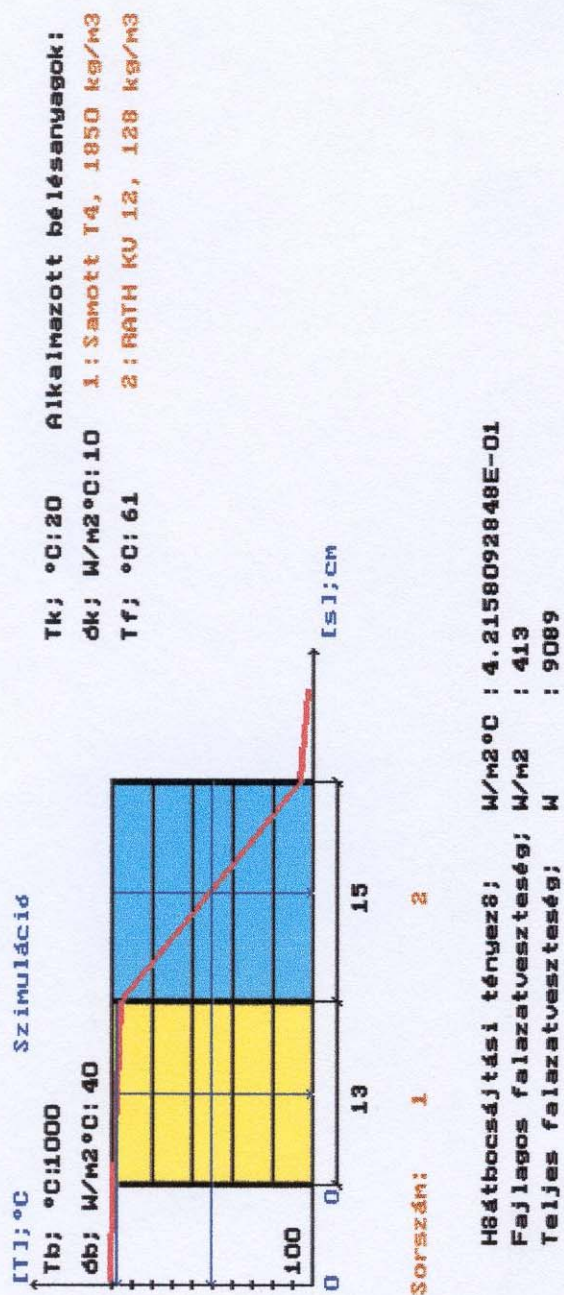
számszerű értékeit.

A fent ismertetett eljárásra, *sikfal.exe* névvel, szoftverrendszert készítettem **Turbo Pascal 6.0** nyelven, ami $n = 1 \dots 3$ rétegszám esetére, grafikus vizualizációval is megjeleníti az adott síkfalal határolt stacioner állapotú rendszer falazatrétegeiben a hőmérséklet lefutását, méretarányos kivitelben [1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 21, 22, 32, 33, 34, 35, 36, 42, 48, 50, 52, 54, 55, 56, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 66, 67, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 78, 79, 80, 81, 82, 90, 92,].

A 11. a)., a 11. b). és a 11. c). ábrák, különböző bélésszerkezetű kemencefalazatok, számítógépes szimulációs eredményeit tartalmazza.

Az alkalmazott szoftver (*sikfal.exe*), a lemez mellékletben található, a DOS-ból indítható.

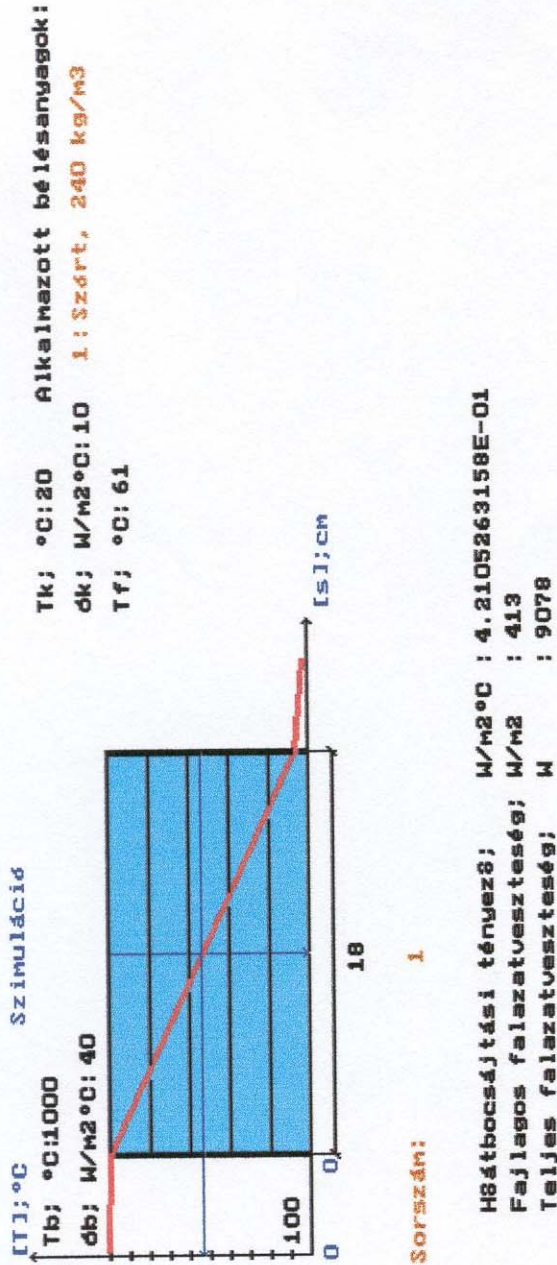
A szoftver futtatásának hardver és szoftver feltételei, megegyeznek az 5.3. fejezetben ismertetett követelményekkel.



Stacioner állapotú, többretegű síkfal réteghőmérsékleteinek szimulációját

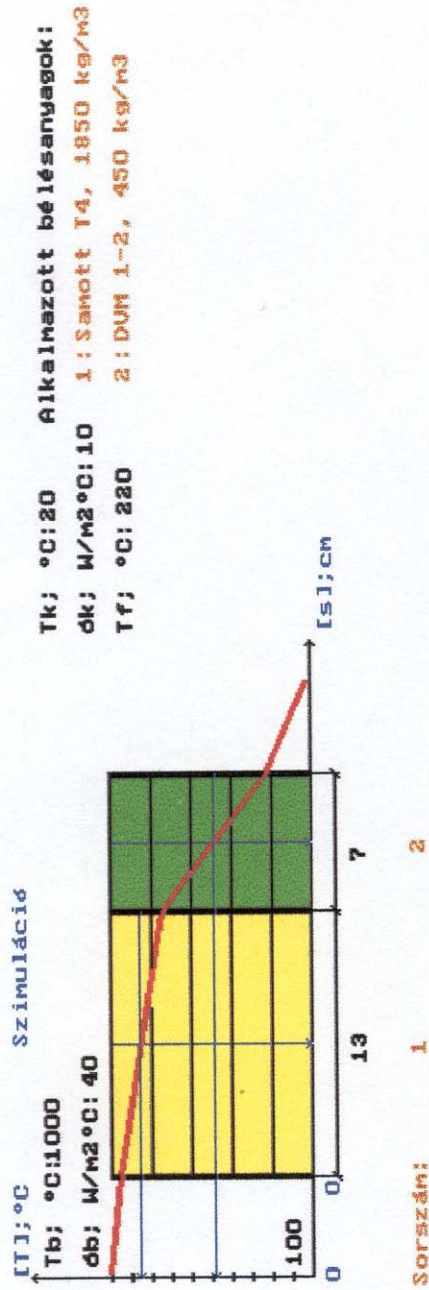
11. a). ábra Különböző bélelényezetű kemencefalazatok számítógépes szimulációja

62 a).



Stationer állapotú, többretegű síkfal réteghőmérsékleteinek szimulációját

11. b). ábra Különböző bélésszerkezetű kemencefalazatok számítógépes szimulációja



Hőátbocsájtási tényező; W/m²: 2.0442930153E+00
Fajlagos falazatveszteség; W/m² : 2003
Teljes falazatveszteség; W : 44075

Stationer állapotú, többretegű síkfal réteghőmérsékleteinek szimulációját

62 b).

11. c). ábra Különböző bélésszerkezetű kemencefalazatok számítógépes szimulációja

5.5. A szimulációs eredmények összevetése a tényleges mérési eredményekkel, valamint a kivitelezésre vonatkozó legfontosabb jellemzők

A mérési eredmények és a regisztrátumok kiértékelése

A szórt falazatú harangkemence, 1-es számú mellékletben található regisztrátumán jól látható, hogy a két hőelem jelleggörbéje teljesen azonosan fut. Ez természetesen homogénebb térhőmérsékletet eredményez, ami a hőkezelendő felület szempontjából nézve, jobb minőséget biztosít a betétnek (kerékabroncs). A szórt falazatú kemence hőkezelési ideje 8 h volt a felfűtéstől a leállásig. Ezzel szemben a hagyományos (samott-thermolit) falazatú kemence esetében, egy hőkezelési ciklus időtartama 12 h 55 percre növekedett, szintén a felfűtéstől a leállásig.. A két hőkezelési idő közötti időkülönbség, 4 h 55 perc volt. Ez az időkülönbség több mint egy fél műszakot eredményezett, 8 h-ás munkaidőre vetítve. A százalékos munka-időmegtakarítás 61,3 % volt.

A mérés idején felvett áramértékekkel meghatározott teljesítményadatok összehasonlítása, a szórt és a hagyományos konstrukció esetére

Alkalmazott mérőműszerek a szórt falazatú kemencére:

- *hőmérsékletérzékelő, NiCr-Ni hőelem;*
- *GAMMA vonalíró, kétszíníró az alsó és felső zónára;*
- *Technoterm 0453/912 digitális kijelzésű tapintó hőmérő, a köpeny külső hőmérsékletének az ellenőrzésére.*

A hagyományos falazatú harangkemence beépített teljesítménymérővel volt ellátva.

A szórt falazatú harangkemence villamos energiaigénye 8 h-ás hőkezelési ciklusra vetítve: 1220,3 kWh.

A hagyományos falazatú harangkemence villamos energiaigénye 12 h 55 perces hőkezelési ciklusra vetítve: 2185,5 kWh.

A két berendezés között 44 %-os villamos energia-megtakarítást értünk el, a korszerű szórt falazattal ellátott kemence javára.

Ezek az eredmények igen figyelemre méltóak, mivel egyértelműen bizonyítják a korszerű anyagok ill. technológiák hatékonyságát, a hagyományos konstrukciókkal szemben.

Természetesen a kerámiaszál bázisú alapanyagokból készülő önálló bélés elemek jóval sérülékenyebbek, de automatizált működtetéssel, ill. betétadagolással, élettartamuk jelentősen meghaladja a hagyományos falazóanyagokból készült berendezéseket, mivel igen jól bírják a gyors és nagy hőingadozásokat.

A mérések körülményeire és hitelességére vonatkozó legfontosabb megoldások ismertetése

A hőmérsékletmérés NiCr-Ni hőelemmel történt.

Az üzemi méréseknél használt hőelemek száma és elhelyezése:

- köpeny 3 x 3 = 9 db, egymástól 120°-ra elhelyezve, alul-középen-felül;

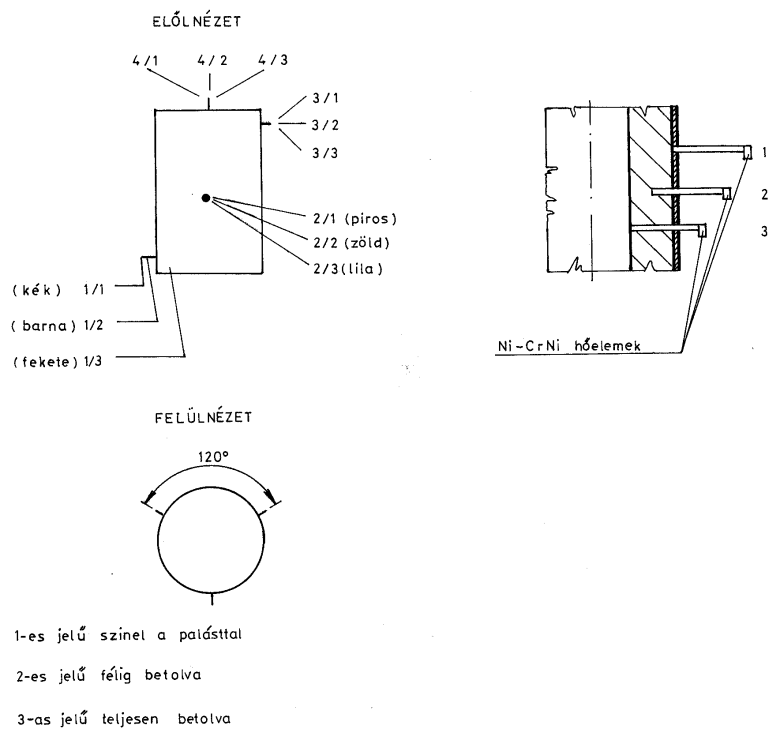
1. a kemence palást szórt külső falazatával színelve;
2. a kemence palást szórt falazat vastagságának közepéig betolva;
3. a kemence palást szórt belső (munkatér) felületével színelve;

- fődém 3 db;

1. a fődém szórt külső falazatával színelve;
2. a fődém szórt falazat vastagságának közepéig betolva;
3. a fődém szórt belső (munkatér) felületével színelve.

A hőelemek a kemence paláston sugárirányban, a fődémen pedig tengelyirányban lettek elhelyezve, a mérések idején adta üzemi lehetőségek figyelembevételével. Természetesen pontosabb eredményt szolgáltatott volna, ha a kemence palástján tengelyirányban, a fődémen pedig sugárirányban kerültek volna beépítésre.

A hőelemek tényleges elhelyezését a 12. ábra mutatja, valamint a mérési eredményeket pedig az 1-es számú melléklet tartalmazza.



12. ábra A Ni-CrNi hőelemek elhelyezése a paláston és a fődémen

A kerámiaszál felszórásának a kivitelezése

Referencia hőszigetelésünk tárgya, az elektromos ellenállás-fűtésű harangkemence köpeny és fődémszerkezet fémfelületeinek a felszórása volt. A kivitelezést a SZIKKTI dolgozói végezték el.

A fémfelületek felszórásos technológiájához való előkészítés több időt igényel, mint bármilyen hagyományos alapanyagú falazat kivitelezése, tehát költségesebb és időigényesebb feladat is egyben.

A fémfelületek előkészítése szórásra

A szerves és a szervesetlen kötőanyag kielégítő adhéziót létesít, a szál és a felület között, mégis célszerűnek tartottuk a köpeny és a fődém fém huzallal való feltüskézését. A tüskék mérete a szigetelőréteg vastagságától, sűrűsége pedig a felület irányítottságától (más a köpeny és más a fődém) esetében) függ.

A harangkemence belső köpenyére hegesztett tüskék kettős feladatot látnak el:

1. a kerámiaszál rögzítése;

2. az elektromos fűtőszál felhelyezése (felakasztása) a fém tüskékre ráhúzott kerámia anyagú fűtőszáltartó csövekre.

Az elektromos fűtőszálat tartó tüskék + kerámia csövek függőleges irányban négy szintet alkotva helyezkednek el, kör-körösen a paláston.

A feltüskézett fém köpeny előkészítésének további munkafázisai a következők voltak:

- a fém felületének teljes zsírtalanítása;

- a fém felületének mentesítése a korróziós elváltozásoktól, RO 40 jelzésű foszfátosító anyag alkalmazásával;

- a kerámiaszál felszórásának kötési szilárdságát úgy értük el, hogy a szórás előtt közvetlenül egy átmeneti réteget képeztünk ki, PREFAM nevű héjragasztóval, amely tapadásjavító szerekkel elegyített agyag

és vízüveg keveréke;

- *ezt a ragasztó anyagot közvetlenül 1-2 mm vastagságban vittük fel a felületre ecsettel, majd a száradás és a szilárdulás előtt, a szórást a-zonnal megkezdtük.*

Természetesen a kerámiaszálakat is alkalmassá kell tenni a felszórás előtt.

A kerámiaszál előkészítésének műveletei:

- *a LOSE (ömlesztett) állapotú kerámiaszál granulálása;*
- *a kerámiaszál felületének előkészítése, az újrafilcelődés ellen granulálás közben vegyszerekkel, ajánlható szátra vonatkoztatva, 1-2%-os mennyiségben pl. a glicerin;*
- *segédanyagok (szerves kötőanyag por formájában) elegyítése a kerámiaszállal, hőtűrőképességének javítása céljából, oldószerként a víz használható.*

A szórás befejezését követő műveletek:

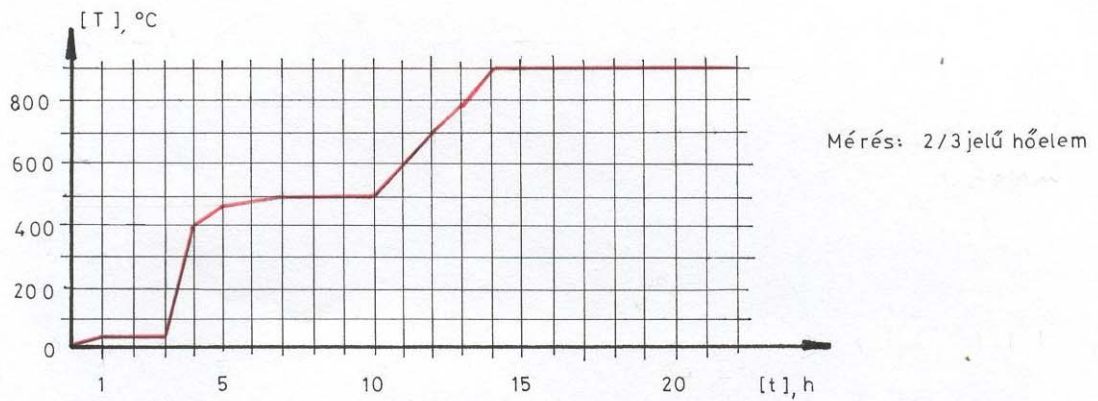
- *az önhordó hőszigetelő réteg (falazat) kiszáritása;*
- *a szerves kötőanyag kiégetése;*
- *felhevítés 900 °C-ra;*
- *lehűtés, önmagára hagyva a kemencét.*

Ezeknek a műveleteknek az időigénye általában 21 órát igényel [42].

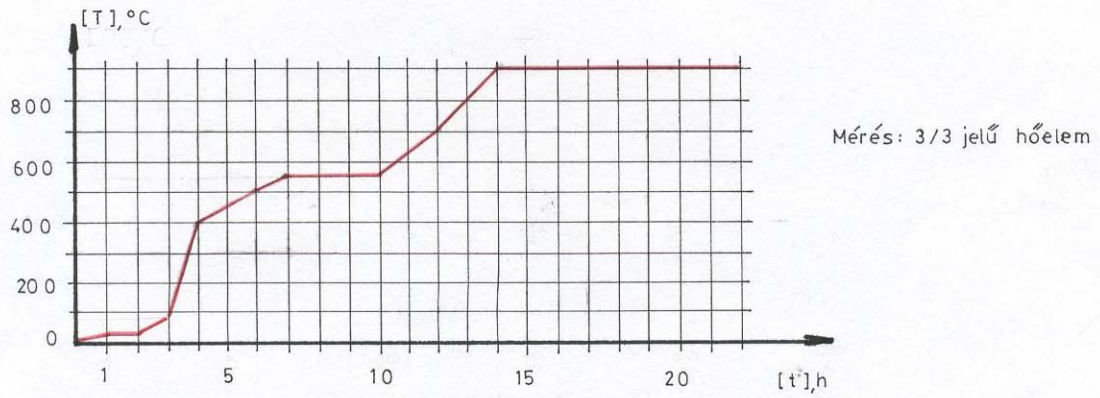
A szórási technológia bemutatását a 13. ábra, a szórt falazat hőkezelésének az elméleti és gyakorlati jelleggörbéit, pedig a 14. ábra szemlélteti.



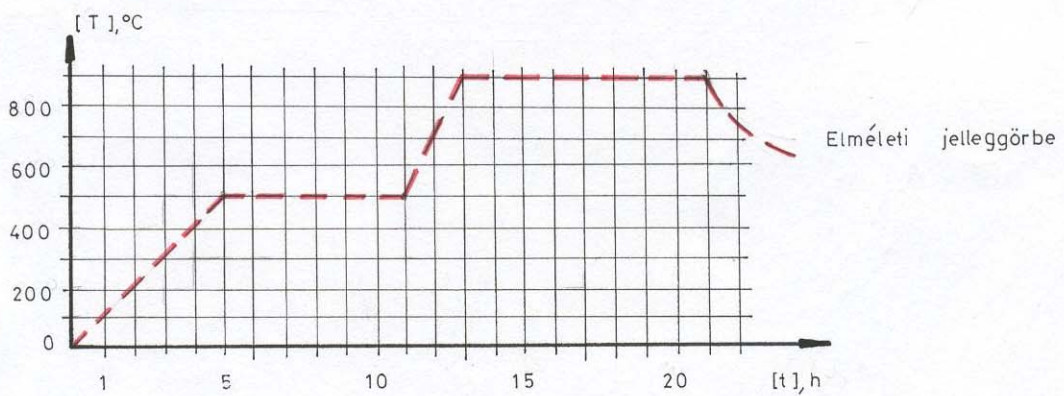
13. ábra A szórt falazat felhordásának bemutatása



Anyagminőség: szórt



Anyagminőség: szórt



Anyagminőség: szórt

14. ábra A felszórt falazat hőkezelésének elméleti és gyakorlati jelleggörbéi

5.6. Az optimális falvastagság meghatározása

Az alábbiakban ismertetésre kerülő, általam kidolgozott eljárás alkalmas, **síkfalal határolt kemencék optimális falvastagságának a meghatározására, $\tau_{fal} > t_{hőkezelés}$ reláció teljesülésekor, egyrétegű szálkerámia alapanyagból készült önhordó és egyben hőálló és hőszigetelő réteg alkalmazása esetében, szakaszos üzemmenetű kemencékre vonatkozólag.**

A T_b , T_k , $T_{köpeny}$, τ_{fal} , $W_{felfűtési}$, S , $t_{hőkezelés}$ kiinduló, illetve számított bemeneti adatok ismeretében, meghatározható szakaszos üzemmenetű kemencék esetében, az optimális falvastagság, a következők szerint:

$$W_{köpeny \text{ melegedése}} = (T_{köpeny} - T_k) / \tau_{fal}, \text{ } ^\circ\text{C/h};$$

$$t_{hőkezelési \text{ hőmérséklet elérési idő}} = T_b / W_{felfűtési}, \text{ h};$$

$$T_{köpeny \text{ a } T_b \text{ elérésének időpillanatában}} = t_{hőkezelési \text{ hőmérséklet elérési idő}} \cdot W_{köpeny \text{ melegedése}}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\text{tg } \alpha = [(T_b - T_{köpeny}) + T_{köpeny \text{ a } T_b \text{ elérésének időpillanatában}}] / S, \text{ } ^\circ\text{C/mm};$$

$$S_{csökkenthető \text{ falvastagság}} = T_{köpeny \text{ a } T_b \text{ elérésének időpillanatában}} / \text{tg } \alpha, \text{ mm};$$

$$S_{optimális} = S - S_{csökkenthető \text{ falvastagság}}, \text{ mm}.$$

A 4. és az 5.4. fejezetben ismertetett kiinduló, illetve számított bemeneti adatok felhasználásával a fenti számítási algoritmussal, a harangkemence 140 mm vastagságú szórt szálkerámia alapanyagú fődémfalazata $\sim 3,1$ mm-rel csökkenthető, tehát $S_{optimális} \sim 136,9$ mm-re adódik.

A fenti algoritmusra **opt.exe** névvel futtatható szoftvert készítettem **Turbo Pascal 6.0** nyelven.

Az alkalmazott szoftver (**opt.exe**), a lemezmellékletben található.

A szoftver futtatásának hardver és szoftver feltételei, megegyeznek az 5.3. fejezetben ismertetett követelményekkel.

Az algoritmizáláshoz szükséges ábrát, az 1-es számú melléklet tartalmazza.

6. Javaslatok a harangkemencék fejlesztésére

A 3. 4. és az 5. fejezetekben részletesen kifejtett és megvilágított problémák végső megoldási javaslatoként, az alábbiakban ismertetendő alternatívákat szeretném bemutatni.

1. Kemencefalazat

A kemencebélés korszerűsítésének ma járható útja az, hogy tervezéskor, nagyjavítások esetén, felújításkor, könnyű energiatakarékos tűzálló anyagokkal (kerámiaszál bázisú) váltsák ki a hagyományos falazatot. Ezt a megoldást megelőzően, a külföldi cégek hőálló anyagainak hőtechnikai ajánlásai alapján, megfelelően méretezett és számítógéppel szimulált hőveszteség számítását kell végezni, melynek réteghőmérséklet számítását, szimulációt, átlaghőmérséklet meghatározást kell tartalmaznia bizonyítékként, a hőveszteségek és a falazatban tárolt hő csökkentésére vonatkozóan. Hőárammérleg, majd ezt követően kemencehatásfok számítását kell elvégezni a legapróbb részletekre is kiterjedően, majd az összesített energiakülönbözeteket vizuálisan is meg kell mutatni, **Shankey-diagramok** készítése alapján. Számszerűleg, százalékosan ki kell mutatnunk a hagyományos és a korszerű bélésanyagok közötti különbséget, szakaszos és folyamatos üzemre, a kemencehatásfok számításának ismeretében [1, 2]:

$$\eta_{\text{kemence}} = \frac{Q_{\text{hasznos}}}{Q_{\text{be}}} \cdot 100 \%$$

Ezekből a számszerű adatkülönbözetektől bizonyítékként kell, hogy szolgáljon a korszerű bélésanyag energiatakarékos előnye a hagyományos anyagokkal szemben [3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 19, 20, 21, 26, 42, 59] .

2. Fűtési rendszer

a.) Gáztüzelés

Az égők által kibocsájtott füstgáz, a falazattal közvetlenül érintkező hatása miatt, **direkt módon nem** használható fel önálló és egyben önhordó falazatként kerámiaszálból készült vákuumformázott és szórt technológiával készült bélésanyag.

Ilyen esetekben kivitelezéskor döngölő sablonok alkalmazásával, megfelelő betonmassza szolgál belső, viszonylag vékony vastagságú munkabélésként. Ennek az anyagnak jó mechanikai és hőlkésálló tűrőképességgel kell rendelkeznie. Hőszigetelésként viszont célszerű, megfelelő vastagságú kerámiaszálpaplant alkalmazni.

Tüzelőegységként az adott üzemeltetési, gazdasági és telepítési viszonyokat szem előtt tartva, érdemes korszerű rekuperátoros gázégőket alkalmaznunk [37, 91,].

Ha ez az egyszerűbb, olcsóbb, gazdaságosabb út nem járható, akkor a hőhasznosítás az alkalmazott izzítási hőmérsékletnek megfelelően konvektív, ill. sugárzó, vagy ezek kombinálása elvén működő rekuperátorok beépítésével oldható meg [84, 85, 86, 87].

Természetesen a megoldási alternatívák közötti különbséget, gazdasági számításoknak kell igazolniuk.

b.) Villamos fűtés

Ennél a fűtési megoldásnál egyszerre alkalmazható önálló munkabélésként és egyben hőszigetelő réteggként, a kerámiaszál alapanyagból készült falazatidom, valamint a felszórásos technológia.

Ez a szerkezet sérülékenyebb volta ellenére is nagyságrenddel kisebb akkumulált hőt eredményez a falazatokban, a kétrétegű (munkabélés + hőszigetelés) anyagkombinációkkal szemben.

Természetesen a fűtőszál élettartamának növelése érdekében, megfelelő felületi terhelés (W/mm^2) értéket kell választanunk a tervezés fázisaiban, a KANTHAL gyártmányismertetőinek ajánlásai alapján [7, 41].

3.) Automatika (vezérlés, szabályozás)

Korszerű kerámiaszál alapanyagokból készült bélésanyagok alkalmazása esetén, tekintve, hogy ezek szilárdsága kicsi, mechanikailag sérülékenyebbek, célszerű automatikus harangműködtetést és betétadagolást kialakítanunk. Erre a legalkalmasabb vezérlő egységek az ipari PC, PLC, DCS rendszerek, valamint a célorientált mikrokontroller.

Alkalmazásuk esetén, megfelelő relés kimenetű illesztőkártyákat, A/D, D/A konvertereket kell, optoelektronikus leválasztásokon keresztül az irányítórendszer és a kemence közé beiktatnunk, megfelelő vezérlő, szabályozó és ellenőrző szoftverek futtatásának alkalmazásával.

A korszerű hőmérsékletszabályozási algoritmusokat is ezeknek az irányítórendszereken futó szoftverrendszereknek kell ellátniuk. A legigényesebb feladatok felügyelete esetén, szünetmentes (áramkimaradás esetén is működő) táp-energiaellátást is biztosítanunk kell.

A hőmérséklettartás legkisebb tűrésintervallumának belülmaradására, a legcélszerűbb PID algoritmust kell megvalósítanunk.

A *real-time* módon történő feldolgozást, megjelenítést folyamatosan frissítendő grafikus képernyőn, a dokumentálást pedig merevlemezen, ill. printeren kell megvalósítanunk [14, 31, 22, 79, 80, 83, 88, 89, 90, 91, 92, 93].

7. Végkövetkeztetések, tézisek

I. Tudományos előzmények, célkitűzés

Célkitűzésem volt, a villamos ellenállás-fűtésű harangkemence hőárammérleg veszteségtételeinek csökkentése. Ez korszerű, energiatakarékos, kis tömegsűrűségű ($\sim 240 \text{ kg/m}^3$), kerámiaszál bázisú, felszört kivitelű, önálló és egyben önhordó köpeny és fődémfalazatként, mint komplett bélésrekonstrukcióval valósult meg.

Kiindulási alapként szolgált, a „Hámor Rt.”-ben működő, hagyományos (samott-thermolit) falazatkonstrukcióval kialakított kerékabroncs hőkezelő harangkemence, valamint a hőárammérlegének számítással és méréssel is történő meghatározása. A berendezés függőleges irányban négy sorban elhelyezett, 6 mm átmérőjű KANTHAL A1-es ellenállás-huzallal fűthető, soronkénti teljesítményszabályozással. A hőkezelendő betét mennyisége 4500 kg/adag, hőkezelési ciklusonként. A hőkezelési hőmérséklet $850 \text{ }^\circ\text{C}$, a külső hőmérsékleti átlag a mérés idején (1990. 01. 10...12-ig) pedig, $-1 \text{ }^\circ\text{C}$ volt.

Ipari körülmények között a méréseimet, a „Hámor Rt.”-ben lévő villamos ellenállás-fűtésű, szakaszos üzemmenetű, felszört és hagyományos falazattal ellátott harangkemencékre végeztem el. Vizsgálataimat természetesen kiterjesztettem a gáztüzelés esetére is, amit az értekezésem 3. fejezete tartalmaz.

Ezirányú ipari tapasztalataim ellenőrzése érdekében, laboratóriumi körülmények között, szintén végeztem méréseket és számításokat, RATH gyártmányú vákuumformázott falazatok, falazatidomok, hőárammérlegeinek, falazatveszteségeinek, az alkalmazott hőszigetelő anyagok T_a átlaghőmérsékleteken történő $\lambda_{\text{ismeretlen}}$ hővezetési tényezők meghatározásainak matematikai módszereivel és kérdéseivel. A matematikai módszerekkel kapott számítási eredményeket, minden esetben mérési adatokkal hasonlítottam össze.

A kísérleti, ill. a végleges megoldást ipari környezetben, az ún. felszórásos technológia jelentette. Az alkalmazott szórás vastagság 140 mm volt, amit meghatározott vékony rétegekben hordtunk fel. A kivitelezést a SZIKKTI dolgozói végezték, az egészségügyi és a biztonsági előírások szigorú betartásának folyamatos ellenőrzése mellett.

A korszerű szórt falazattal kialakított kemence külső köpenyhőmérséklete üzem közben 47 °C-ra adódott.

Ezzel szemben, a hagyományos béléssel ellátott harangkemence külső köpenyhőmérséklete üzem közben 120 °C volt, ami duplája a megengedett érintésvédelmi előírásban foglaltaknak.

A szórt falazattal ellátott harangkemence teljes villamos energiaigénye, 8 h-ás hőkezelési ciklusra vetítve:

$$P_{\text{vill (szórt)}} \cong 861 \text{ kWh.}$$

A hagyományos falazattal ellátott harangkemence teljes villamos energiaigénye, 12 h 55 perces hőkezelési ciklusra vetítve:

$$P_{\text{vill (hagyományos)}} \cong 2206 \text{ kWh.}$$

A két különböző bélés konstrukció közötti jelentős mértékű 4 h 55 perces időeltérést, a falazat felmelegítéséhez szükséges entalpiakülönbséget eredményezte.

Referenciaberendezésünk (szórt oldalfal, földém), igen figyelemreméltó ~ 60,7 % villamos energiabevitel-megtakarítást eredményezett.

A két konstrukció közötti hőkezelési időkülönbséget, ami 4 h 55 perc volt, hőkezelési ciklusokra (8 h) vetítve ~ 61,3 %-os munkaidő-megtakarítást jelentett.

Levonható lényeges konklúzió az, hogy a korszerű és a hagyományos anyagok közötti entalpiabevitel-különbséget igen jelentős mértékű, ami természetesen nagyarányú energia-megtakarítással is jár.

A feni számszerű adatok ismeretében, a „Hámmor Rt.”-ben üzemelő harangkemencepark több kemencéjén is elvégeztük a bélésrekonstrukciót, ami mind számítási, mind pedig mérési oldalon, a referenciaberendezésünknek megfelelő hőtechnikai eredményt mutatott.

Megállapítható az a fontos tény, hogy a komplett kemencefalazatok rekonstrukciójának ma járható útja a falazatok, falazatidomok, kialakításának és szigetelésének kivitelezését, kis tömegű és kis fajlagos

hőkapacitású kerámiaszál bázisú alapanyagok beépítésével kell megvalósítani.

Ezek az anyagok mechanikailag jóval sérülékenyebbek a hagyományos falazóanyagokkal szemben, de a korszerű vezérléstechnikai lehetőségek alkalmazása lehetővé teszi a betét pontos automatikus adagolását.

A kerámiaszál alapanyagok hőtűrőképessége, hőlékésállósága nagyságrendekkel nagyobb a hagyományos anyagokkal szemben, tehát sokkal alkalmasabbak a szakaszos üzemű kemencék bélésének kialakítására.

A korszerű anyagok beépítési költsége, az alkalmazott technológiáktól függetlenül is magasabb, a hagyományos anyagok kivitelezési áraival szemben.

A számításhoz szükséges programokat, *Turbo Pascal 6.0* nyelven készítettem el grafikus felület felhasználásával, a dokumentálás pedig a *Windows 98* alatt futó *Word 97* szövegszerkesztővel történt.

II. A vizsgálatok módszere, a kísérletek rövid leírása

Mérőműszerek:

- *a hőmérséklet érzékelése NiCr-Ni hőelemekkel történt;*
- *GAMMA vonalíró, kétszíníró az alsó és a felső zónára;*
- *tapintó hőmérő (tip.: Technoterm 0453/912 digitális kijelzésű), a köpeny külső hőmérsékletének az ellenőrzésére.*

A mérés körülményeire és hitelességére vonatkozó legfontosabb megoldások ismertetése

Az üzemi méréseknél használt hőelemek száma és beépítésük módja:

- *köpeny 3 x 3 = 9 db, egymástól 120 °-ra elhelyezve, alul-középen-felül;*
 1. a kemence palást szórt külső falazatával színelve;
 2. a kemence palást szórt falazat vastagságának közepéig betolva;
 3. a kemence palást szórt belső (munkatér) felületével színelve;

- fődém 3 db;

1. a kemence fődém szórt külső falazatával színelve;
2. a kemence fődém szórt falazat vastagságának közepéig betolva;
3. a kemence fődém szórt belső (munkatér) felületével színelve.

A paláston a hőelemeket sugárirányban, a fődémen pedig tengelyirányban, a mérések idején adta üzemi lehetőségek figyelembevételével építettük be. Természetesen pontosabb eredményt szolgáltatott volna, ha a paláston tengelyirányban, a fődémen pedig sugárirányban lettek volna elhelyezve, de ez a beépítési lehetőség üzemi adottság volt.

A kivitelezés rövid leírása:

- *a fémfelületek zsírtalanítása;*
- *a felszórando felületek tüskézése hegesztéssel;*
- *a kerámiaszál rétegekben történő felszórása;*
- *a fűtőszáltartó kerámiacsövek felhelyezése, beragasztása;*
- *a fűtőszálak felhelyezése;*
- *a szórt falazat kiszáritása;*
- *a szerves kötőanyag kiégetése;*
- *felfűtés 900 °C-ra;*
- *lehűtés önmagára hagyva;*
- *beüzemelés, a tényleges üzemmenet szerint.*

III. A kutatómunkám elvégzésével nyert új tudományos és műszakilag hasznosítható eredmények, tézisek összefoglalása

1. Kutatási tevékenységem eredményeként, villamos ellenállás-fűtésű és gáztüzelésű kemence-falazatok éves üzemköltségére vonatkozólag, 1 m² felületre vetítve, a következő empirikus egyenletet állítottam fel:

$$\text{Büm}k_{(v)} = \text{Fal}v_{(g, v)} + 0,05 \cdot \text{Tá}hv_{(g)} + K_f \cdot \text{Kmb}k_{(g)}, \text{ Ft/m}^2\text{a.}$$

Az egyenlet a következő kiinduló paraméterek esetében alkalmazható:

- *maximális térhőmérséklet $T_{max} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$;*
- *a munkabélés T4 minőségű samott, 1850 kg/m^3 , gáztüzelés esetén;*
- *a hőszigetelő réteg kerámiaszál paplan, 128 kg/m^3 tömegsűrűségű, gáztüzelésre vonatkoztatva;*
- *kerámiaszál bázisú, önálló, önhordó vákuumformázott falazatidom, 240 kg/m^3 tömegsűrűségű, villamos ellenállás-fűtésre vonatkoztatva;*
- *belső hőátadási tényező $\alpha_b = 40 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$;*
- *külső hőátadási tényező $\alpha_k = 10 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$;*
- *külső levegőhőmérséklet, ill. falhőmérséklet: $T_k = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{fal} = 61 \text{ }^\circ\text{C}$.*

Az empirikus egyenlet betűkombinációinak jelölése:

[Büm $k_{(v)}$]: a bélés éves üzemköltsége villamos fűtésre vetítve, Ft/m²a;

[Fal $v_{(g, v)}$]: a falveszteség ellentételezéséhez szükséges tüzelőanyag ill. villamos energia éves költsége, gáztüzelésre és villamos ellenállás-fűtésre vonatkoztatva, Ft/m²a;

[Tá $hv_{(g)}$]: a tárolási hőveszteség ellentételezéséhez szükséges tüzelőanyag éves költsége gáztüzelésre vetítve, Ft/m²a;

[Kmb $k_{(g)}$]: a kemencebélés éves költsége gáztüzelésre vetítve, Ft/m²a;

[K f]: költségfaktor = Kmb $k_{(v)}$ / Kmb $k_{(g)}$.

2. Szakaszos üzemmenetű harangkemence (ipari körülmények) és laborkemence egyrétegű szálkerámia falazatában kialakuló hőmérséklet/idő jelleggörbe, *instacioner állapotban*, hőkezelendő betéttel, az alábbiakban általam meghatározott exponenciális alakú egyenlettel modellezhető:

$$T(t) = h(t) \Big|_{x_{be}(t) = 1(t)} = A_p \left[1 + \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-[(t-\tau_h)/\tau_1]} + \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-[(t-\tau_h)/\tau_2]} \right].$$

Az egyenletben alkalmazott jelölések:

$[A_p]$: a kemence arányos átviteli tényezője, °C/MJ, °C/GJ; $[\tau_h]$: a zárt rendszer holtideje, h; $[\tau_1]$: a szálkerámia falazat időállandója, h; $[\tau_2]$: a hőkezelendő betét időállandója, h.

Ipari körülmények között a méréseimet a „Hámor Rt.”-ben működő, 140 mm vastagságban felszórt, szálkerámia alapanyagú falazattal ellátott harangkemencére végeztem el. Végeredményként a következő adatokat kaptam:

- az átlagértékekkel számolva, a zárt rendszer holtideje $\tau_h \cong 2,5$ h;

- a felfűtési sebesség ~ 200 °C/h-ra adódott.

Természetesen részletes méréseket, számításokat, vizsgálatokat végeztem laboratóriumi körülmények között is, 125 mm vastagságú, vákuumformázott kerámiaszál bélésű (RATH alapanyagú), villamos ellenállás-fűtésű, vákuum munkaterű, porcelán hőkezelő kemencén [22, 79, 80].

Számított, mért és ellenőrzött adatok:

- üzemi hőmérséklet $T_{üzemi} = 980$ °C;

- az átlagértékekkel számolva a zárt rendszer holtideje $\tau_h \cong 1$ min; a felfűtési sebesség ~ 50 °C/min; a lehűlési sebesség pedig ~ 60 °C/min (a kemence önmagára hagyva).

Az átviteli tényezők és az időállandók meghatározása (h: harang, l: laboratóriumi):

$$Q_{teljes} \cong 3,1 \text{ GJ}, \Delta T = 851 \text{ °C}, A_{ph} = \Delta T / Q_{teljes} = 851 / 3,1 = 274,5 \text{ °C/GJ};$$

$$Q_{teljes} \cong 4,5 \text{ MJ}, \Delta T = 960 \text{ °C}, A_{pl} = \Delta T / Q_{teljes} = 960 / 4,5 = 212,5 \text{ °C/MJ};$$

$$\tau_{1h} = R \cdot C = Q_{fal (köpeny)} / \Phi_{fal (köpeny) ve} = 592,8 \cdot 584 \cdot 803 / 5881,8 \cong 13 \text{ h};$$

$$\tau_{1h} = R \cdot C = Q_{fal (födém)} / \Phi_{fal (födém) ve} = 150,7 \cdot 584 \cdot 808 / 1939 \cong 10,2 \text{ h};$$

$$\tau_{1l} = R \cdot C = Q_{fal (köpeny)} / \Phi_{fal (köpeny) ve} = 5,28 \cdot 584 \cdot 920 / 98 \cong 8,0 \text{ h};$$

$$\tau_{1l} = R \cdot C = Q_{fal (födém)} / \Phi_{fal (födém) ve} = 2,4 \cdot 584 \cdot 896 / 61,4 \cong 5,7 \text{ h}.$$

3. A falazatveszteség többszöri iterációs számítási, nehézségi és pontossági meghatározási problémáinak a megoldása és meggyorsítása érdekében, kidolgoztam egy komplett hőtechnikai számítási módszert, stacioner esetre, síkmetszet, ill. síkfalal határolt kemencék esetére.

3/a. Az újszerű módszer lényege az, hogy adott kiindulási paraméterek pontos megadása után, meghatározza „n” rétegszámból álló falazatkonstrukció esetére stacioner állapotban, síkfalal határolt testekre alkalmazva, az alábbi kiszámítandó adatok:

- $[k]$: hőátbocsátási tényező, $W/m^2 \text{ } ^\circ C$;
- $[\Phi_{fajl}]$: hőáramsűrűség, W/m^2 ;
- $[\Phi_{teljes}]$: teljes hőáram, W ;
- $[T_0 \dots T_{n+1}]$: réteghőmérsékletek, $^\circ C$;
- $[T_{a0} \dots T_{an}]$: átlaghőmérsékletek, $^\circ C$;
- $[\lambda_{a0} \dots \lambda_{an}]$: hővezetési tényezők, $W/m^\circ C$

számszerű értékeit.

3/b. A számítási módszerrel meghatározható, külön-külön az egyes rétegek $\lambda_{\text{ismeretlen}}$ hővezetési tényezői számított T_a átlaghőmérsékleteken, a következő reláció teljesülése esetén, $T_{(i-1)} = < T_a < = T_{(i)}$ az alábbi egyenlettel:

$$\lambda_{\text{ismeretlen}} = \lambda_{(i)} - \frac{(T_{(i)} - T_a) (\lambda_{(i)} - \lambda_{(i-1)})}{(T_{(i)} - T_{(i-1)})}, W/m^\circ C.$$

Laboratóriumi és ipari méréseket, vizsgálatokat végeztem RATH KV-12, valamint SIBRAL ömlesztett konzisztenciájú, kerámiaszál alapanyagokból készített vákuumformázott, ill. felszört, $\sim 240 \text{ kg/m}^3$ látszólagos tömegsűrűséggel kivitelezett kemencefalazatok esetében, a fent ismertetett egyenlet alkalmazhatóságára.

Példaként egy RATH KV-12 alapanyagból készített vákuumformázott idom esetében, számított $T_a = 631 \text{ °C}$ átlaghőmérsékleten, a fenti képlet alkalmazásával, a $\lambda_{\text{ismeretlen}} = 0,0962 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ értékűre adódott, a megfelelő bemeneti adatok ismeretében.

A módszer helyességét úgy vizsgáltam, hogy a hőmérsékletet 50 °C -os lépcsőkben növeltem, mértem a kemence belső térhőmérsékletét és a köpenyhőmérsékletet NiCr-Ni hőelemmel, az ellenőrzésre analóg mutatós, ill. a köpenyhőmérséklet mérésére, digitális kijelzésű $^\circ\text{C}$ mérő műszerek szolgálták. A mért adatokból 1 m^2 felületre és adott $s = 0,125 \text{ m}$, ill. $s = 0,14 \text{ m}$ falvastagság esetében meghatároztam a hőáramokat, majd ezt követően kiszámítottam a hővezetési tényező értékeit. Lényeges eltérést a számított és a mért adatok között nem találtam, ami a felállított modellem helyességét támasztotta alá.

3/c. A **3/a.** és a **3/b.** tézispontok számítási gyorsaságainak megkönnyítése érdekében, *Turbo Pascal 6.0 programnyelven, grafikus felület felhasználásával, elkészítettem a sifal.exe és a grafikon.exe szoftvereket.*

4. Síkfalal határolt kemencék optimális falvastagságának a meghatározására alkalmas eljárást dolgoztam ki, ami a $\tau_{\text{fal}} > t_{\text{hőkezelés}}$ reláció teljesülésekor, egyrétegű szálkerámia alapanyagból készült önhordó és egyben hőálló és hőszigetelő réteg alkalmazása esetében, szakaszos üzemmenetű kemencékre vonatkozik.

A T_b , T_k , $T_{\text{köpeny}}$, τ_{fal} , $W_{\text{felfűtési}}$, S , $t_{\text{hőkezelés}}$ kiinduló, illetve számított bemeneti adatok ismeretében, meghatároztam szakaszos üzemmenetű kemencékre vonatkozóan, az optimális falvastagságot az alábbiak szerint:

$$W_{\text{köpeny melegedése}} = (T_{\text{köpeny}} - T_k) / \tau_{\text{fal}}, \text{ °C/h};$$

$$t_{\text{hőkezelési hőmérséklet elérési idő}} = T_b / W_{\text{felfűtési}}, \text{ h};$$

$$T_{\text{köpeny a } T_b \text{ elérésének időpillanatában}} = t_{\text{hőkezelési hőmérséklet elérési idő}} \cdot W_{\text{köpeny melegedése}}, \text{ °C};$$

$$\text{tg } \alpha = [(T_b - T_{\text{köpeny}}) + T_{\text{köpeny a } T_b \text{ elérésének időpillanatában}}] / s, \text{ °C/mm};$$

$$S_{\text{csökkenthető falvastagság}} = T_{\text{köpeny a } T_b \text{ elérésének időpillanatában}} / \text{tg } \alpha, \text{ mm};$$

$$S_{\text{optimális}} = S - S_{\text{csökkenthető falvastagság}}, \text{ mm}.$$

A 4. és az 5.4. fejezetben ismertetett kiinduló, illetve számított bemeneti adatok felhasználásával a fenti számítási algoritmussal, a harangkemence 140 mm vastagságú szórt szálkerámia alapanyagú födémfalazata $\sim 3,1$ mm-rel csökkenthető, tehát $S_{\text{optimális}} \sim 136,9$ mm-re adódik.

A fenti algoritmusra *opt.exe* névvel futtatható szoftvert készítettem *Turbo Pascal 6.0* nyelven.

IV. A tudományos eredmények hasznosításának lehetőségei

A munkám első szakaszát, már 1987-ben a tudományos igényű számítási módszerek és ezek gyakorlati alkalmazásainak együttes igénye indukálta. A kombinált energiagazdálkodás helyzete, a rohamosan növekvő energiahordozók árának együttes kölcsönhatása követelte meg, hogy a Magyarországon lévő kemencepark, ezen belül a harangkemencék falatzakszerúsítési alternatíváit fontolóra vegyem. Ma lehetséges járható út a falazatok rekonstrukcióiban, a kis tömegsűrűségű ($120...240 \text{ kg/m}^3$), kerámiaszál alapanyagú szigetelőpaplanok, vákuumformázott falazatidomok, valamint a felszórásos technológia alkalmazása.

A **III. 1.** tézis hasznos információt nyújt, a kemencebélés üzemköltségének a meghatározásáról éves szintre vetítve, empirikus formában, a gáztüzelés és a villamos ellenállás-fűtés alternatíváit szemelőtt tartva.

A **III. 2.** tézisben identifikált exponenciális egyenlet, a kiindulási feltételeket ismerve, matematikai úton, a felfűtési szakaszra jellemző instacioner kemence modelljét állítja fel, a hőkezelendő betétel együtt vizsgálva a zárt rendszert. Jelentősége abban rejlik, hogy bonyolult és

drága rendszerkonstrukciók modellezhetőek, passzív áramköri elemekből (ellenállás, kondenzátor, induktivitás, termisztor) felépített áramkörökkel, ill. példaként említve olyan szoftverek alkalmazását, mint a **MATLAB**, amely rendelkezik konkrét átviteli tagokkal, melyek megfelelő összekapcsolásával és kombinálásával, komplett rendszerek vizsgálhatók.

A **III. 3.** tézis a hőtechnikai méretezés, tervezés, ellenőrzés fázisaira a legalkalmasabb, síkfalakkal határolt berendezések esetében, stacioner állapotra vonatkozólag. A számítások végeredménye grafikus úton is megjeleníthető, ami szimulációs úton információt szolgáltat a tényleges kialakításról.

A **III. 4.** tézis a kivitelezési költséget csökkenti, valamint adott feladatra szakaszos kemenceüzemeltetés esetében, optimalizálja a falazat vastagságát.

Az új tudományos eredményeim együttes felhasználása, alkalmazása, elősegíti összességében a kemencepark, ezen belül a harangkemencék felújításának és korszerűsítésének alternatíváit, a tervezés, a kivitelezés és a beüzemelés fázisaiban. A nyert eredmények hasznosíthatók a Miskolci Egyetemen folyó graduális és post graduális oktatásban is, a kemencék és az energiagazdálkodás témájú tantárgyakban.

A számítógéppel történt mérés, adatgyűjtés és szabályozás megvalósítására vonatkozó legfontosabb információk laboratóriumi körülményekre vonatkozóan

A NiCr-Ni hőelem analóg jelét, a mérőerősítőn keresztül fogadó analóg/digitális átalakító, az ANALOG DEVICES gyártmányú, ADC 1100-as típusú, 11 bites A/D konvertere volt. Az A/D konverter digitalizált jelét, a PC-be helyezett I/O kártya fogadta. A mintavételezési idő 1 s volt, mivel a hőmérséklet változásaiból következően nincs szükség rövidebb időintervallumokra. Az alábbiakban a *beo* nevezetű függvényeljárás assembler rutinját mutatom be, ami az A/D konverter szoftverműködtetéséhez szükséges.

```
function beo:integer;assembler;
label cim1,cim2,cim3,cim4;
asm
    MOV DX,0303h
    MOV AL,09h
    OUT DX,AL
    MOV AL,08h
    OUT DX,AL
    MOV BL,$FF
cim1: DEC BL
    JNZ cim1
    MOV AL,09h
    OUT DX,AL
    MOV DX,0302h
cim2: IN AL,DX
    AND AL,01h
```



```

JZ cim3
JMP cim2
cim3: IN AL,DX
      AND AL,01h
      JZ cim4
      JMP cim3
cim4: MOV DX,0301h
      IN AL,DX
      AND AL,07h
      MOV AH,AL
      MOV DX,0300h
      IN AL,DX
end;

```

A fentiekben bemutatott *beo* nevű függvényeljárást, a főprogramban hívjuk meg másodpercenként, a mintavételezési időnek megfelelően. A működtető szoftver *real-time* módon dolgozza fel az adatokat. A digitalizált jel átkonvertálása hőmérsékleti értéké, a következő aránypárral történik:

$$(beo / 2047) \cdot 1300 = T, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Példaként, ha a $beo = 945$, akkor $T = 600,14 \text{ } ^\circ\text{C}$ -ra adódik.

Az A/D konverter illesztése, a PC-be helyezett I/O kártyához

A NiCr-Ni hőelemet, kompenzációs vezeték alkalmazásával a mérőerősítőn és a kiegyenlítő áramkörön keresztül kötöttem az A/D konverter analóg inputjához. A konverter outputját a PC-be helyezett I/O kártya megfelelő bemeneti portjaira csatlakoztattam. A biztonságos stabilizált, megfelelően szűrt és védelemmel ellátott tápfeszültséget, egy külön PC tápegység szolgáltatotta. Az A/D konverter digitális outputját, az I/O kártyán elhelyezett 1 db INTEL gyártmányú 8255 un. PIO áramkör fogadta, amely 3 db egyenként 8 bites portján keresztül, egyidejűleg 24 egymástól független I/O vonalat tud kezelni. Az I/O kártya 2 x 31 pontos I/O csatlakozóba helyezendő, ami a PC alaplapján található. A külső csatlakozást egy 50 pólusú CANNON-G típusú csatlakozó biztosította, egy 50 eres szalagkábelén keresztül. A periféria IC három üzemmódja közül én a MODE 0-ást választottam, mivel ez alapvető INPUT/OUTPUT-t jelent.

Az INTEL 8255 PIO címei:

- *parancsregiszter, 0303h;*
- *A port, 300h;*
- *B port 301h;*
- *C port, 302h.*

Az INTEL 8255 PIO programozása:

	A	C _f		B	C _a		
vezérlőbyte:	D ₇	D ₆	D ₅	D ₄	D ₃	D ₂	D ₁ D ₀
	1	0	0	0	1	0	0 1 = 89h
	O	I		O	I		

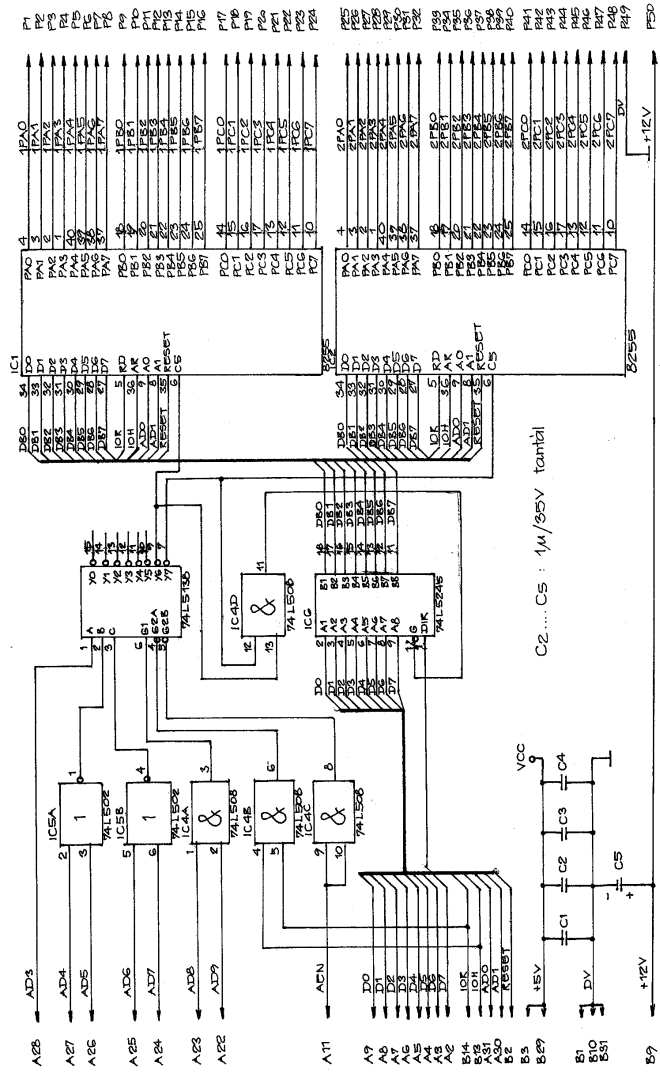
I jelentése input (1), O jelentése output (0).

A programozásból adódik, hogy az A, B portok output-ként, a C port pedig input-ként szerepel.

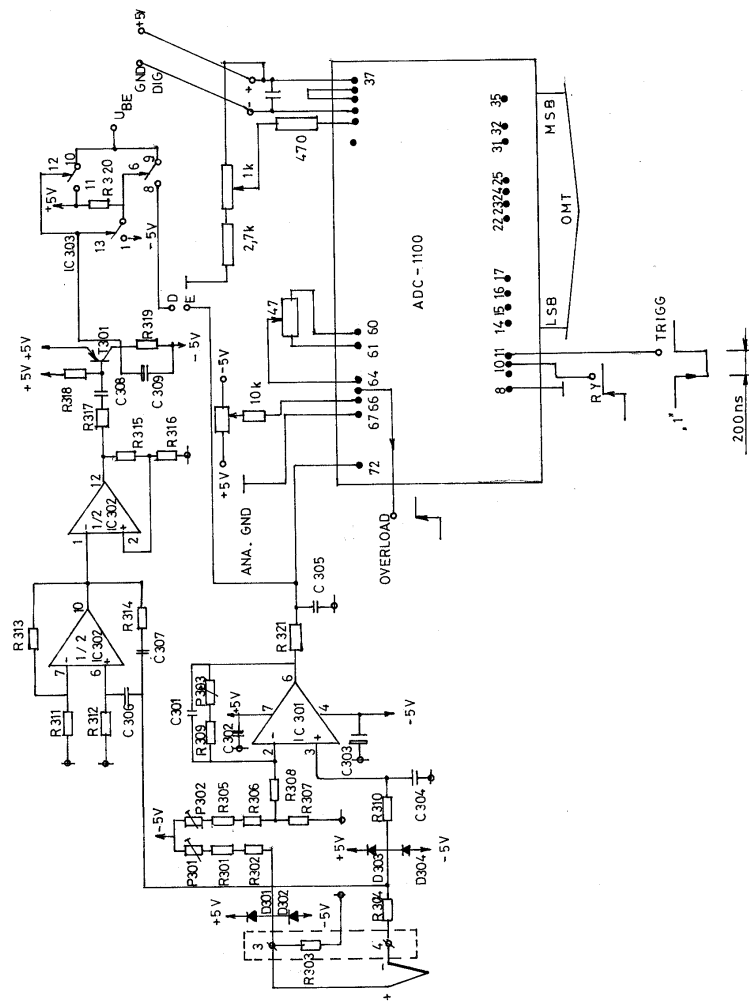
Az INTEL 8255 PIO MODE 0-ás üzemmód beállításának assembler rutinja az alábbi:

```
MOV DX,0303h
MOV AL,89h
OUT DX,AL.
```

Az I/O kártya kapcsolási rajzát a 15. ábra, a hőmérsékletmérő elektronikát pedig a 16. ábra szemlélteti [22, 79, 80, 89]. A berendezés fényképe az 1-es számú mellékletben található.



15. ábra Az I/O kártya kapcsolási rajza



16. ábra A hőmérsékletmérő elektronika kapcsolási rajza

V. Utószó

Ezúton szeretnék köszönetet mondani tudományos vezetőmnek Dr. Farkas Ottónénak, az értekezésem megírásához nyújtott sok hasznos információért, valamint a Miskolci Egyetem Hőenergiagazdálkodási Intézet Tüzeléstani Tanszék dolgozóinak, a Miskolci Egyetem Villamosmérnöki Intézet Automatizálási Tanszék illetékes kollégáinak, a Miskolci Egyetem Könyvtára munkatársainak az irodalomkutatásban végzett segítségükért, a SZIKKTI, a „Hámor Rt.” és a KÉTÜSZ illetékes szakembereinek, a kivitelezések és a mérések megvalósításában tett munkájukért.

Miskolc, 2002. február

Tisztelettel: _____
Gárdus Zoltán

Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Farkas Ottóné - Dr. Nagy Géza: Tüzeléstan
Tankönyvkiadó, Budapest, 1985.
- [2] Dr. Farkas Ottóné: Kohászati kemencék
Tankönyvkiadó, Budapest, 1985.
- [3] Dr. Farkas Ottóné: Ipari kemencék tüzeléstani számításai
Tankönyvkiadó, Budapest, 1990.
- [4] Dr. Kapros Tibor: Műszaki hőtan
Phare Program HU - 94.05.
MISKOLCI EGYETEM
Hőenergiagazdálkodási Intézet
Energiahasznosítási Kihelyezett Tanszék
Miskolc, 1997.
- [5] Dr. Bíró Attila: Hőkezelő berendezések
Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1979.
- [6] Dr. Bíró Attila: Computing of Furnace Operations
Bíró Engineering Ltd. Budapest, 1994.
- [7] KANTHAL kézikönyv 1970.
(The KANTHAL Corporation)
- [8] RATH: Vacuumformteile
Technische Daten
- [9] Austria - Plibrico
FEUERFESTKONSTRUKTIONEN GESELLSCHAFT M.B.H.
- [10] CARBORUNDUM RESISTANT MATERIALS
- [11] KERATHERM
Vakuumgeformte Keramikfaser vom Spezialisten

- [12] Johns - Manville
Refractory Products
- [13] Dr. Votih Márton: A képlékenyalakítás elmélete
Nagy alakváltozások tana
Miskolci Egyetemi Kiadó, 1998.
- [14] Dr. Helm László: Ipari folyamatok műszerezése
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1966.
- [15] Szilikátipari kézikönyv
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1982.
- [16] Mérnöki kézikönyv 1.
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981.
- [17] Lőrincz Imre: Vegyi és rokonipari mérőműszerek
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1967.
- [18] J. Perry: Vegyészmérnökök kézikönyve
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1968.
- [19] Talabér: Cementipari kézikönyv
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965.
- [20] Reményi Károly: Új technológiák az energetikában
MTA, Budapest, 1996.
- [21] Altnéder János: Tüzelőberendezések falazati hőveszteségének
mérése, számítása és bélésének méretezése
Energiagazdálkodási Tudományos Egyesület Miskolci Csoportja
TÜKI Tüzeléstechnikai Kutató és Fejlesztő Vállalat
XXV. Ipari szeminárium
Miskolc, 1987.
p. 137-182

- [22] Dr. Farkas Ottóné - Gárdus Zoltán: Hőmegetakarítási, valamint kemence vezérlési és szabályozási eredményeink, egyedi tervezésű, elektromos ellenállásfűtésű, laboratóriumi, vákuum munkaterrű hőkezelő kemencéknél
Energiagazdálkodási Tudományos Egyesület Miskolci Szervezete
TÜKI Tüzeléstechnikai Kutató és Fejlesztő Rt.
XXXI. Ipari szeminárium
Miskolc, 1995.
p. 83-93.
- [23] Deák Béla; Fodor Gyula; et al.: 100Cr6 minőségű kovácsolt golyóscsapágy-gyűrűk szferoidizációs lágyítása növelt betétsúlyú védőgázos harangkemencében
Gépgyártástechnológia
37. k., 9. sz., 1997.
p. 26-27.
- [24] Nitsch, J.: Automatisierung einer Haubenofen-batterie für das Blankgluhen von Buntmetallhalbzeug
Gas Waerme International
44. k., 9. sz., 1995.
p. 409-418.
- [25] Golikov, Yu. G.; Podol'skij, B. G.; et al.: Modernized plants for accelerated cooling of coils in bell-type furnaces
Stal'
11. sz., 1994.
p. 51-54.
- [26] Fodor Gy. - Hodgyai G. - Dr. Kovács M. - Pózer I. - Wolf F.: Harangkemencék energetikai- és környezetvédelmi korszerűsítése
DUNAFERR VOEST-ALPINE HIDEGHENGERMŰ KFT.
TÜZELÉSTECHNIKA
XXXV. Ipari Szeminárium
Miskolc, 1999.
- [27] HEINRICH GRÜNEWALD
INDUSTRIEOFENBAU
Industrial Furnaces

- [28] LOI THERMPROCESS
Buntmetalltechnik
- [29] HPH bell-type annealing palants
LOI Thermoprocess GmbH
- [30] HICON
EBNER JOURNAL
Volume 6, issue 1, March 1998.
- [31] Bánhidi László - Kiss Mátyás: AUTOMATIKA
az önműködő irányítás és ellenőrzés elméleti alapjai
Tankönyvkiadó, Budapest, 1982.
- [32] Angster Erzsébet - Kertész László: Turbo Pascal 6.0
feladatgyűjtemény I.
Felelős kiadó: Angster Erzsébet - Kertész László, 1991.
- [33] Angster Erzsébet - Kertész László: Turbo Pascal 6.0
feladatgyűjtemény II.
Felelős kiadó: Angster Erzsébet - Kertész László, 1991.
- [34] OBJEKTUM - ORIENTÁLT PROGRAMOZÁS
TURBO PASCAL 6.0 - ban
TURBO VISION
ComputerBooks
Budapest, 1991.
- [35] Clarence B. Germain: IBM PC XT/AT programozói kézikönyv
NOVOTRADE
Budapest, 1988.
- [36] Szlávi Péter - Zsakó László: Módszeres programozás
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1986.
- [37] Bükki Gergely: Energetika
Tankönyvkiadó, Budapest, 1997.

- [38] Neményi Rezső: Védőgázos hőkezelés
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1974.
- [39] Bánhidi László - Oláh Miklós - Gyuricza István - Kiss Mátyás -
- Rátkai László - Szecső Gusztáv: AUTOMATIKA
mérnököknek
Miskolci Egyetem, Automatikai Tanszék
Tankönyvkiadó, Budapest, 1992.
- [40] Dr. Fodor György: Mértékegység lexikon
Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1990.
- [41] KANTHAL kézikönyv
AKTIEBOLAGET KANTHAL . S-73401
HALLSTAHAMMAR . Svédország
1970.
- [42] SZIKKTI
Durvakerámia és Szigetelőanyag Osztály
Kerámiaszál-bázisú szórt hőszigetelő
anyagok kifejlesztése
Zárójelentés (Dr. Losonczy Géza tud. főmunkatárs, témafelelős)
Témaszám: 16-10-III/4.4
Budapest, 1988. 11.
- [43] Péter Gyula: Kerámiaipari Kemencék
Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1982.
- [44] R. P. Feynman - R. B. Leighton - M. Sands: Mai fizika 4.
Statisztikus mechanika
Termodinamika
Hullámtan
Szimmetriák a fizika törvényeiben
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985.
- [45] Energiagazdálkodási Statisztikai Évkönyv
Állami Energetikai és Energiabiztonságtechnikai Felügyelet
Budapest, 1980.

- [46] Heiligenstaedt, W.: Ipari kemencék hőtechnikai számításai
Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1958.
- [47] Dr. Farkas Ottóné - Woperáné Dr. Serédi Ágnes - Grán József:
Kohászati kemencék atlasz
Tankönyvkiadó, Budapest, 1982.
- [48] Dr. Nagy Géza: Kemencék építőanyagai III.
Tankönyvkiadó, Budapest, 1980.
- [49] Dr. Diószeghy Dániel: Kohászati kemencék II.
Tankönyvkiadó, Budapest, 1967.
- [50] Barczi, M. - Hammer, F. és társai: Tűzálló anyagok és falazatok
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1971.
- [51] Dr. Farkas Ottóné: Technológiai kemencék tervezése
Tankönyvkiadó, Budapest, 1975.
- [52] Magnezitipari Művek: Gyártmány katalógusa
Budapest, 1979.
- [53] Dr. Bíró Attila: Izzítókemencék
Tankönyvkiadó, Budapest, 1965.
- [54] Dr. Bíró Attila: Hőátadási viszonyok vizsgálata földgáztüzelésű
kohászati izzítókemencékben (doktori értekezés)
Miskolc, 1975.
- [55] Dr. Szűcs Ervin: A hasonlóságelmélet alapjai
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1967.
- [56] Dr. Szűcs Ervin: A hasonlóságelmélet alkalmazása, modellkísérletek
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1969.
- [57] Csépai Dezső és társai: Olvasztó-, izzító- és hőkezelő kemencék
konstrukciójának és üzemének műszaki, gazdasági értékelése
Elemzőtanulmány
Budapest, 1977.

- [58] MOTIM gyártmányismertető
Mosonmagyaróvár, 1980.
- [59] DIDIER cég gyártmánykatalógus (terméktájékoztató)
- [60] Farkas Sándor: Energiatakarékosság korszerű kemencefalazat kialakítással
ETE - TÜKI Ipari Szeminárium előadásgyűjteménye
Miskolc, 1975.
- [61] Vörös T. - Dévényi I. - Farkas S. - Román I.: Új habsamott hőszigetelő anyag
Bányászati - Kohászati Lapok
Kohászat, 103.
1970.
- [62] Albert János: Hőszigetelés kézikönyve
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1962.
- [63] Novák József: Szálkerámiai szigetelők
ETE - TÜKI Ipari Szeminárium előadásgyűjteménye
Miskolc, 1980.
- [64] Csilly László: Tűzálló hőszigetelő anyagok gyártása és felhasználása
ETE - TÜKI Ipari Szeminárium előadásgyűjteménye
Miskolc, 1980.
- [65] M. Vajta: LOW ORDER APPROXIMATION OF A CLASS OF PARABOLIC PARTIAL DIFFERENTIAL EQUATIONS
TEMP98-2.DOC
- [66] Mudra László - Szűcs Lajos: Harangkemencék műszaki tapasztalatai és fejlesztési lehetőségei
ETE - TÜKI Ipari Szeminárium előadásgyűjteménye
Miskolc, 1970.

- [67] Könnyűbeton és Szigetelőanyagipari Vállalat katalógusa hő- és hangszigetelő anyagokról
Budapest, 1980.
- [68] Szvencsanszkij, A. D.: Ellenállás fűtésű kemencék számítása. Előadásgyűjtemény. KGYV
Budapest, 1976.
- [69] KGYV Gyártmányismertetője az elektromos kemencékről
Budapest, 1971.
- [70] Dr. Imre László: Hőátvitel elmélet és áramlástan
Tankönyvkiadó, Budapest, 1978.
- [71] Mihejev, M. A.: A hőátadás gyakorlati számításának alapjai
Tankönyvkiadó, Budapest, 1973.
- [72] DIDIER cég katalógusa a "Pyrostop" hőszigetelő anyagokról
Wien, 1981.
- [73] Dr. Kismarty Loránd: Tűzállóanyagok
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1956.
- [74] Altnéder János: Tüzelőberendezések falazati hőveszteségének mérése, számítása és bélésének méretezése
Energiagazdálkodási Intézet kiadványa, Budapest, 1987.
- [75] Altnéder János: Az ipari kemencék falazati hőveszteségének jelentősége energiagazdálkodási szempontból
BKL Kohászat, 1981. 2. szám
- [76] Kanev, N.G.; Krochotin, V.L.; et al.: Neubau einer Haubengluhanlage in Russland-Erfahrungsbericht
Gas Waerme International
44. k., 9.sz., 1995.
p. 427-434.

- [77] Brinkmann, R.; Isermann, R.; Nolte, K.: Computergestutzte Betriebsführung einer Haubengluherei
Gas Waerme International
44. k., 9. sz., 1995.
p. 419-426.
- [78] Molnár Mátyás: Word 6
ComputerBooks
Budapest, 1994.
- [79] Gárdus Zoltán: Finomkerámiai vákuum hőkezelő kemence tervezése
Záródolgozat
Miskolci Egyetem, 1996.
- [80] Gárdus Zoltán: Automatikus adagolású fogtechnikai laborkemence grafikus megjelenítésű vezérlő és szabályozó szoftver
microCAD - SYSTEM '93
Nemzetközi Informatikai Találkozó
II. helyezés Az ipari információs rendszerek kategóriájában
- [81] Gárdus Zoltán: Ismeretlen hővezetési tényező meghatározásának számítógépes algoritmizálása, T_a számított átlaghőmérsékleten
BKL, Kohászat 6-7. szám (összevont), 2000.
p. 256-259.
- [82] Gárdus Zoltán: Különböző falazatkonstrukciójú kemencebélésszerkezetek számítógépes szimulációja
TÜZELÉSTECHNIKA 2000.
Az előadás elhangzott Miskolcon, a Tudomány és Technika Házában, 2000. 09. 21-én.
XXXVI. Ipari Szeminárium
Miskolc, 2000.
p. 129-137.
- [83] Dr. Ajtonyi István - Gárdus Zoltán: A XILINX gate-array eszközrendszer alkalmazása a vezérléstechnika tárgy oktatásában
microCAD-SYSTEM '92
Nemzetközi Számítástechnikai Találkozó, Miskolc, 1992. február
p. 295-307.

- [84] Dr. Farkas Ottóné - Dr. Varga Gyula: A rekuperátoros gázégőkkel elérhető energiamegtakarítás további eredményei I.
BKL, Kohászat, 1992. március - április
p. 114-116.
- [85] Dr. Farkas Ottóné - Dr. Varga Gyula: A rekuperátoros gázégőkkel elérhető energiamegtakarítás további eredményei II.
BKL, Kohászat, 1992. június
p. 215-221.
- [86] Dr. Farkas Ottóné: Hőkezelő és izzítókemencék füstgázainak rekuperátoros gázégővel elérhető hasznosítási eredményei
BKL, Kohászat, 1990. 2. szám
- [87] Dr. Bíró Attila: Ipari kemencék
Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 1993.
Kühne rekuperátor
p. 187.
- [88] Raymond G. Jackuot: Modern digital control systems
University of Wyoming
Laramie, Wyoming
MARCEL DEKKER, INC. New York and Basel, 1981.
- [89] ANALOG DEVICES katalógus
- [90] Selmei József - Csikyné Palásthy Zsuzsanna - Németh Tamás -
- Tímár Milán - Tímár Milánné - Dr. Török István: Összetett hő-
átadási jelenségek vizsgálata harangkemencén számítógépes
modellezéssel
TÜKI Tüzeléstechnikai Kutató és Fejlesztő Rt.
TÜZELÉSTECHNIKA
XXXV. Ipari Szeminárium
Miskolc, 1999.
p. 119-126.

- [91] Kühne Miklós - Tircsiné Mucsi Györgyi - Pózer István - Hodgyai Gábor - Fodor Gyula: Harangkemence tüzelési rendszer korszerűsítés pyronics égőkkel
"DWA DUNAFERR-Voest Alpine Hideghengermű KFT.
TÜKI Tüzeléstechnikai Kutató és Fejlesztő Rt.
TÜZELÉSTECHNIKA
XXXV. Ipari Szeminárium
Miskolc, 1999.
p. 103-117.
- [92] Gárdus Zoltán: A hőkezelés gazdasági vonzata
The Economic Implications of Heat Treatment
A Miskolci Egyetem Közleményei
Anyag-és Kohómérnöki Tudományok
II. sorozat 28. kötet
Miskolci Egyetemi Kiadó
Miskolc, 2000.
p. 109-121.
- [93] Gárdus Zoltán - Dr. Farkas Otóné: Szakaszos üzemű hőkezelő kemencék hőtechnikai modellezése
BKL, Kohászat 3. szám, 2001.
p. 73-77.
- [94] Zoltán Gárdus: Wall-modeling of intermittent-running furnaces
3rd INTERNATIONAL CONFERENCE OF PHD STUDENTS
University of Miskolc, Hungary
13-19 August 2001
ENGINEERING SCIENCES
Volume I.
Printed at the University of Miskolc
ME. Tu. 640/2001.
ISBN 963 661 480 6
ISBN 963 661 482 2
p. 115-123.

- [95] Gárdus Zoltán - Dr. Farkas Ottóné: Magyar - angol szószedet
Tüzeléstan - automatika tárgyköréből, szakaszos üzemű, hőkezelő
harangkemencék témakörből
Miskolci Egyetem
Anyag-és Kohómérnöki Kar
Tüzeléstan Tanszék
2001 kézirat, Tü 2001/1010390 - M.E.
- [96] Gárdus Zoltán - Dr. Farkas Ottóné: Szakaszos üzemű hőkezelő ke-
mencék tűzálló falazatainak kialakítása számítógépes szimuláció
segítségével
A MISKOLCI EGYETEM
Anyag-és Kohómérnöki Karának Tudományos Ülésszaka
MAB Székház 2001. szeptember 11-12.
Az előadás elhangzott Miskolcon, a MAB Székházban
Miskolc, 2001. szeptember 11.

Alkalmazott jelölések

- A - felület, m^2 ;
C - sugárzási szám, W/m^2K^4 ; hőkapacitás, $J/^\circ C$;
D - átmérő, m;
E - energia, J;
I - áramerősség, A;
P - villamos teljesítmény, kWh;
Q - entalpia, J, kJ, MJ, GJ;
R - villamos ellenállás, Ω ; hőellenállás, $s^\circ C/J$;
T - hőmérséklet, K, $^\circ C$;
V - lángtérfogat, térfogat, m^3 ;
V - a kiáramló tüzelőanyag térfogatárama m^3/s , m^3/h ;
 A_p - a proporcionális tag átviteli tényezője, $^\circ C/MJ$, $^\circ C/GJ$;
Bümk - a kemencebélés éves üzemköltsége, Ft/m^2a ;
Falv - a falveszteség ellentételezéséhez szükséges energia éves költsége, Ft/m^2a ;
Ha - fűtőérték, J/kg;
Kf - költségfaktor, mértékegység nélküli;
Kmbk - a kemencebélés éves költsége, Ft/m^2a ;
Nu - Nusselt-szám, mértékegység nélküli;
Pr - Prandtl szám, mértékegység nélküli;
Re - Reynolds-szám, mértékegység nélküli;
Táhv - a tárolási hőveszteség ellentételezéséhez szükséges éves energia költsége, Ft/m^2a ;
a - a rekuperátor fajlagos költsége 1évre vetítve, Ft/m^2a ;
b - energia egységára, Ft/GJ ;
 c_p - fajlagos hőkapacitás, J/kgK , J/m^3K ;
h - magasság, m;
i - elemszám, pozitív egész szám, mértékegység nélküli;
k - hőátbocsájtási tényező, W/m^2K , $W/m^2\ ^\circ C$;
m - tömeg, kg;
n - rétegszám, mértékegység nélküli;
q - kemence hőterhelése, J/h, kW;
s - rétegvastagság, m (számítógépes ábrákon cm);
t - idő, s, min, h;
w - sebesség, m/s;

Indexek alkalmazása:

- a - átlag;
 - b - belső;
 - be - bemenet, bevitt;
 - fajl - fajlagos;
 - fal - falazat;
 - fal átlag - falazat átlag;
 - fal tár - falazatban tárolt;
 - fsg - füstgáz;
 - g - gáz;
 - h - harang;
 - k - konvekciós, külső;
 - khheip - köpeny, a hőkezelési hőmérséklet elérésének időpillanatában;
 - ki - kimenet;
 - kiláng - kilángolási;
 - l - labor;
 - opt - optimális;
 - ta ve - tüzelőanyag veszteség;
 - tényl - tényleges;
 - ve - veszteség;
 - v, vill - villamos;
 - x - x-irányú ismeretlen;
 - xi - x-irányú ismeretlen;
 - yi - y-irányú ismeretlen;
- Φ - hőáram, W;
- α - hőátadási tényező, W/m²K, W/m² °C;
- ε - emissziós tényező, mértékegység nélküli;
- η - hatásfok (kemence, rekuperátor), %;
- φ - átömlési tényező, mértékegység nélküli;
- λ - hővezetési tényező, W/mK, W/m°C (számítógépes ábrákon L);
- v - kinematikai viszkozitás, m²/s;
- ρ - sűrűség, kg/m³;
- τ - időállandó s, min, h;

Összefoglaló

Felsőfokú tanulmányaim első lépéseként, 1987-ben automatizálási üzemmérnöki oklevelet szereztem Kazincbarcikán, mérés és automatizálási szakon, a Nehézipari Műszaki Egyetem Vegyipari Automatizálási Karán. Oklevelem megszerzése után, tervezői, kutatói, beüzemelői tevékenységeket folytattam az Energiagazdálkodási Intézet Ipari Technológiai Szakosztályában. Az eltöltött közel nyolc év alatt, legnagyobb részben ipari és laboratóriumi izzító és hőkezelő kemencék tervezésével, beüzemelésével, falazatkonstrukcióinak kialakításával, valamint automatizálásuk megoldási alternatíváival foglalkoztam. Kutatási tevékenységet végeztem, különböző falazatkonstrukciók, ezen belül főleg a szálkerámiák alkalmazási lehetőségeinek a kidolgozására, valamint a többszörös iterációs számítási módszerekre számítógépes szoftvereket dolgoztam ki. Részletesen foglalkoztam a falazatok különböző rétegeiben, a hővezetési tényezők átlaghőmérsékleteken történő meghatározásainak hőtani, matematikai problémáival, linearizálási lehetőségeivel, valamint számítógépes algoritmizálásával, programozásával és a falazatveszteség meghatározásának kérdéseivel.

Tevékenységem ilyen irányú folytatásaként, a **Szilikátipari Központi Kutató és Tervező Intézet**-tel (SZIKKTI) közös szerződés keretén belül, kifejlesztettük a kerámiaszál bázisú tűzálló és hőszigetelő anyagok felszórásának a technológiáját, ahol szervesen részt vettem a számítógéppel modellezett számítási módszerek kidolgozásában, valamint a szórófej gépészeti kiviteli konstrukciós terveinek elkészítésében és a berendezés beüzemelésében, majd az adatok dokumentálásában.

Több referencia berendezést készítettünk, ahol a felszórt kerámiaszál, megfelelő rögzítés alkalmazásával, önálló, önhordó falazatként és födémként szolgál, a „Hámor Rt.”-ben működő kerékabroncs hőkezelő harangkemencék falazataként, kizárólag villamos ellenállásfűtés esetére.

A felszórásos kivitel és a hagyományos (samott-thermolit) falazatok adatainak összehasonlító eredményei, 40...60 %-os energia-megtakarítást eredményeztek, az új és a korszerű technológia javára.

1991-től a Miskolci Egyetem jelenlegi Automatizálási Tanszékén dolgozom tanszéki mérnökként, majd önképzésem és kutatási területem

folytatásaként, 1996-ban alakítástechnológiai szakon, kohómérnöki oklevelet szereztem.

Közben 1993-ban a microCAD-SYSTEM Nemzetközi Számítástechnikai Találkozóán, az „Információs rendszerek” kategóriájában II. helyezést értem el, *„Automatikus adagolású fogtechnikai laborkemence grafikus megjelenítésű vezérlő és szabályozó szoftverrendszer”*-ével.

Munkámat ilyen aspektusból folytatva, társszerzőként szerepelek a TŰZELÉSTECHNIKA „95” XXXI. Ipari Szemináriumának kiadványában, *„Hőmegtakarítási, valamint kemence vezérlési és szabályozási eredményeink, egyedi tervezésű, elektromos ellenállás-fűtésű, laboratóriumi vákuum munkaterű hőkezelő kemencéknél”* témakörben.

Ezt követően folyamatosan tudományos igénnyel publikálok. Előadást tartottam a TŰZELÉSTECHNIKA 2000 XXXVI. Ipari Szemináriumán *„Különböző falazatkonstrukciójú kemencebélésszerkezetek számítógépes szimulációja”* címmel. Aktívan vettem részt, a Miskolci Egyetemen 2001. 08. 13-19-e között megrendezett 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE OF Ph.D. STUDENTS *„WALL-MODELING OF INTERMITTENT-RUNNING FURNACES”* angol nyelvű előadásom kapcsán. Társszerzős előadást tartottam a Miskolci Egyetem Anyag-és Kohómérnöki Karának Tudományos Ülésszakán Miskolcon, amit a MAB Székházban 2001. 09. 11-12-e között rendeztek meg *„Szakaszos üzemű hőkezelő kemencék tűzálló falazatainak kialakítása számítógépes szimuláció segítségével”* témában.

Munkám ilyen irányú tovább folytatására az inspirált, hogy az energiahordozók árának az utóbbi 20-25 évben tapasztalt nagyarányú növekedését, korszerű, energiatakarékos anyagokból készülő bélés és szigetelőanyagok alkalmazásával lehessen mérsékelni, a bevitt energiamennyiség csökkentése alapján.

1998. nyarán felvételt nyertem, egyéni felkészítésű doktorandus hallgatóként, a *Műszaki Tudományág Metallurgia c. doktori program, Anyagtechnológiákbeli energiafelhasználás alprogramára.*

Kötelező vizsgáim letétele után, az abszolutórium megszerzésének a birtokában, 1999. júliusában „*summa cum laude*” minősítéssel három tantárgyból, doktori szigorlatot teljesítettem.

Ezt követően az Anyag-és Kohómérnöki Kar Tüzeléstani Tanszékén, „*Hőkezelő harangkemencék falazatkorszerűsítése*” témakörben dolgozom

a Ph.D. fokozat megszerzése céljából. 2000. októberében dolgozatom munkahelyi vitáján, munkásságomat elismeréssel fogadták a jelenlévő szakemberek.

Disszertációm és célkitűzéseim végeredményeként, meg kellett határoznom a legkisebb hőveszteséggel járó falazatszerkezetet, annak hőtechnikai, fizikai, mechanikai és anyagtechnológiai tulajdonságait. Vizsgálataimat kiterjesztettem a gáztüzelés és a villamos ellenállásfűtés dilemmájának az esetére is.

Végeredményként tézisek születtek, egyenletek és számítógépes grafikus szimulációs szoftverek formájában.

Mindezek és az üzemi tapasztalatok birtokában, konkrét fejlesztési javaslatokat tettem energiatakarékos, hőkezelő harangkemencék esetére is.

Az új tudományos eredményeim felhasználhatók, a hőkezelő kemencék tervezésében, építésben, a tüzeléstan, az energiagazdálkodás, valamint a számítógépes modellezés témakörű tantárgyak oktatásában is, a graduális és a post graduális képzésben.

2001. 09. 13-án a Miskolci Egyetem Idegennyelvi Oktatási Központjában, angol nyelvből a Ph.D. fokozathoz szükséges szakmai nyelvvizsgát tettem.

Miskolc, 2002. február

Tisztelettel: _____
Gárdus Zoltán

Summary

In 1987, I graduated as an automation product engineer in Kazincbarcika from the measuring and automation major at the Faculty of Industrial Chemistry of the Heavy Industrial and Technical University. After graduation I worked in the fields of planning, research and operation of furnace at the Technologies Department of the Institute of Energetics. During the nearly eight years I spent there I mostly dealt with planning and putting into operation industrial and laboratorial heating and tempering furnaces, building up their wall constructions and working out alternative solutions for their automation. I did research on working out application possibilities for different refractory wall constructions, especially ceramic strings, and I worked out computer software for multi-iterative calculation methods. I dealt thoroughly with the thermodynamic, mathematical problems of determining the thermal conductivity at average temperature in different layers of the walls, I dealt with the possibilities of linearising this as well as with making computational algorithms, programming and also with the question of determining the wall heat loss.

I continued to work on this field as I entered into an agreement with the **Central Research and Planning Institute of Silicate Industry (SZIKKTI)**. We developed a technology of spraying ceramic string based, refractory and insulating materials. I took part in working out computer-modelled calculation methods as well as preparing the construction plans for the engineering implementation of the spray-cone, putting the device in operation and I also took part in the documentation of the data.

We produced several reference devices for “Hámor Rt.” where they worked as the walls of wheel-rim tempering furnace bell-type, but solely for electric resistance heated furnaces. The sprayed ceramic string, if adequate fastening is used, serves as independent, self-sustaining wall and ceiling.

The results of comparing the performance data of the sprayed design with the traditional (fire-clay–thermolit) walls showed a 40...60% saving of energy in favour of the new and up-to-date technology.

Since 1991 I work at the present-day Automation Department of the University of Miskolc. Continuing my self-instruction and research I

graduated as metallurgical engineer from the forming-technology major in 1996.

In the meantime I achieved II. place in the category of “Information Systems” at the microCAD-SYSTEM International Conference with ***“Automatikus adagolású fogtechnikai laborkemence grafikus megjelenítésű vezérlő és szabályozó szoftverrendszer”***.

Continuing this aspect of my work I figure as co-author in the publication of the XXXI. Industrial Seminar FIRING TECHNOLOGY “95”, in the topic of ***“Hőmegtakarítási, valamint kemence vezérlési és szabályozási eredményeink, egyedi tervezésű, elektromos ellenállás-fűtésű, laboratóriumi vákuum munkaterű hőkezelő kemencéknél”***.

Since that time I have been publishing scientific articles. I gave a lecture on ***“Különböző falazatkonstrukciójú kemencebélésszerkezetek számítógépes szimulációja”*** in the XXXVI. Industrial Seminar FIRING TECHNOLOGY 2000. In connection with my lecture ***“WALL-MODELING OF INTERMITTENT-RUNNING FURNACES”*** I took part in the 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE OF Ph.D. STUDENTS organised 13-19 th August, 2001. I gave a lecture as a co-author on ***“Szakaszos üzemű hőkezelő kemencék tűzálló falazatainak kialakítása számítógépes szimuláció segítségével”*** on the Scientific Session in Miskolc of the Material-and Metallurgical Engineering Faculty of University of Miskolc in the MAB organised 11-12 th September, 2001.

I was inspired to continue my work on this field so as to moderate the huge increase in cost of energy in the last 20-25 years by reducing the energy input through using linings and insulating materials that consist of up-to-date, energy-sparing materials.

In 1998 I was admitted as individually preparing Ph.D. student to the subprogram of ***Use of Energy in Material Technologies, within the Technical Science Metallurgy c. doctorate program.***

After having passed the required exams and having achieved the university leaving certificate, I accomplished my Ph.D. sessional examination in three subjects with a ***“summa cum laude”*** grade in July, 1999.

Since then I work at the Firing Technology Department of the Material- and Metallurgical Engineering Faculty in the topic of “*Modernization the wall of the Tempering Furnace Bells*” to accomplish my Ph.D.. In October, 2000. my thesis was put to workplace debate and my work was well spoken of by the present experts.

As the conclusion of my thesis and my aim I had to determine the wall construction with the least heat-loss, and the heat-technological, physical, mechanical and material-technological characteristics of it. I also widened my research to the problem of gas-firing and electric resistance heating.

As a result theses were created in the form of equations and computer graphic simulation software.

Due to all this and having a lot of technological experience I also came forward with concrete development plans for energy-sparing, tempering furnace bells.

My new scientific results can also be used in undergraduate education in subjects that cover themes which deal with tempering furnaces, firing technologies, energetics and computer modelling.

On 13 th September, 2001. I passed the Ph.D.-type examination in English in the Centre of the Foreign Language Education at the University of Miskolc.

Miskolc, February, 2002.

Yours Sincerely: _____
Zoltán Gárdus

Hőkezelő harangkemencék falatzakorszerűsítése

MELLÉKLETEK

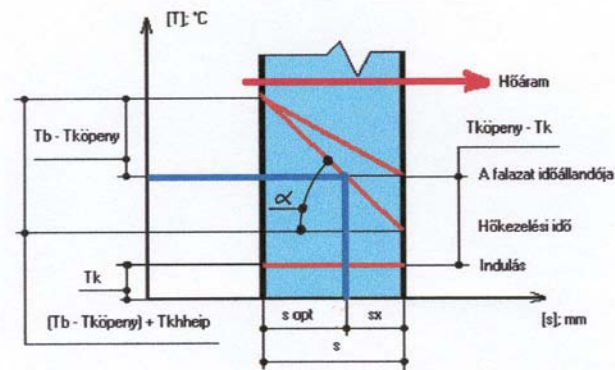
(1-es számú)

Tartalom:

- Optimális falvastagság meghatározása
- Hőkezelési jegyzőkönyv
- Számítógépes printerlapok
- Publikációim jegyzéke
- Magyar - angol szöszedet
Tűzeléstan - automatika tárgyköréből, szakaszos üzemi,
hőkezelő harangkemencék témaköréből
- grafikon.pas forráslista
- sikfal.pas forráslista
- opt.pas forráslista
- fénykép
- CD ROM

(Minimális hardware konfiguráció: INTEL 80486 DX4 processzor
16 MB RAM
3,5" floppy driver
CD ROM driver
VGA videó kártya, monitor, egér

Minimális software követelmények: MS-DOS operációs rendszer
6.22-es verzió
Windows 95 operációs rendszer
Turbo Pascal 6.0)



Alkalmazott jelölések:

$[T_b]$: hőkezelési hőmérséklet, °C;

$[T_k]$: környezeti hőmérséklet, °C;

$[T_{kheip}]$: köpenyhőmérséklet, a hőkezelési hőmérséklet elérésének időpillanatában, °C;

$[s]$: falvastagság, mm;

$[s_x]$: csökkenthető falvastagság, mm;

$[s_{opt}]$: optimális falvastagság;

$[\tau_{fal}]$: egyrétegű szálkerámia alapanyagú falazat időállandója, h;

$[t_{hőkezelés}]$: hőkezelési idő, h.

Síkfalal határolt kemencék optimális falvastagságának a meghatározása, $\tau_{fal} > t_{hőkezelés}$ reláció teljesülésekor, egyrétegű szálkerámia alapanyagból készült önhordó és egyben hőálló és hőszigetelő réteg alkalmazása esetében, szakaszos üzemű kemencékre vonatkozólag

Kéményseprő és Tüzelés-
technikai Szolgáltató V.
Miskolc, Vologda u.

Csicsey T.

Gárdus Zoltán/Béresné
/k/90

mérési jegyzőkönyv

Mellékelten küldjük a falazat hőkezelési jegyzőkönyvét szives
felhasználásukra.

Üdvözlettel:


Kovács Ferenc
főmunkatárs


Dobó József
irodavezető

Az eredeti példányt átvettem:

Dátum:
Bélyegző:
Aláírás:



MELLÉKLET

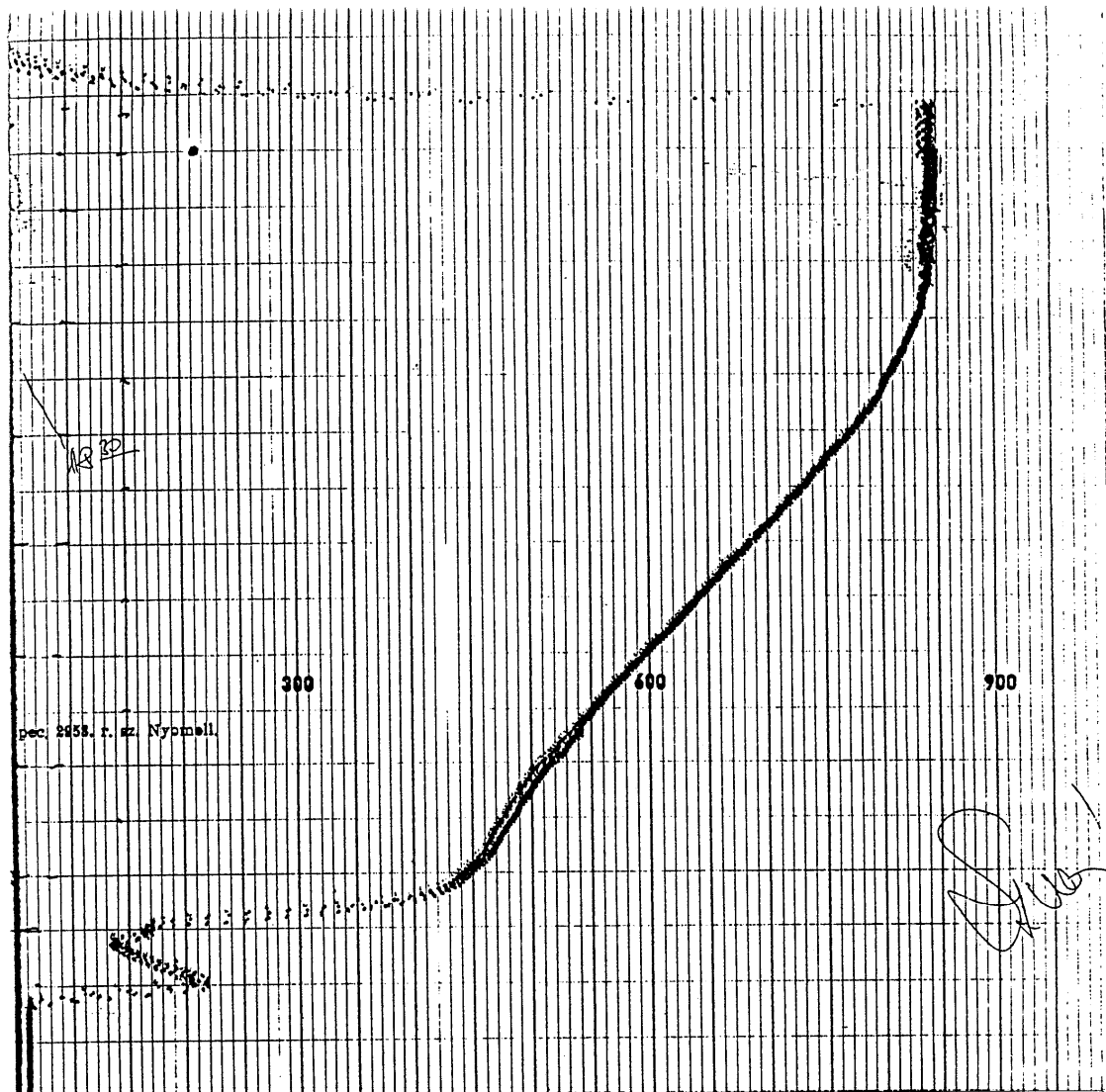
A szálszórási kemence diagramm kiértékelése

Szalagsebesség:	10-140 mm		
<u>Pontosan:</u>	140+179 mm	-	206 40p - 186 30p
	319 mm	-	26 10p - 130p
	147 mm	-	60p
	1 mm	-	0,4p

A 3.sz. kemence kb. 126 40p-től indult!(kb. 5 perc műszer-
meghibásodás elhárítása. Feszültség U=380V!

$$P = t \cdot I \cdot U$$

Szakasz	Idő ó	Szalag mm	Áram A	Teljesítmény kWó
1.	5,83	-	450	996,93
2.	0,38	56,5	450	64,98
3.	0,0066	1	280	6,71
4.	0,0816	12	450	13,96
5.	0,007	11	280	0,745
6.	0,0986	14,5	450	18,87
7.	0,0238	3,5	280	2,53
8.	0,0612	9,0	450	10,47
9.	0,034	5,0	280	3,62
10.	0,051	7,5	450	8,72
11.	0,027	4,0	280	2,895
12.	0,0136	2,0	220	1,14
13.	0,0272	4,0	450	4,653
14.	0,0374	9,6	280	3,98
15.	0,0136	2,0	220	1,14
16.	0,0136	2,0	450	2,33
17.	0,034	5,0	280	3,62
18.	0,0136	2,0	220	1,14
19.	0,0102	1,5	450	1,74
20.	0,0306	4,5	280	3,26
21.	0,017	2,5	60	0,39
22.	0,0646	9,6	280	6,88
23.	0,017	2,5	220	1,42
24.	0,007	1,0	280	0,72
25.	0,4557	67,0	280	48,5
26.	0,6054	89,0	60	13,8
27.	0,0136	2,0	220	1,14
	7,9756			1.220,28 kWó
	<u>kb.86</u>			<u>kb. 1.220,3 kWó</u>



Szórt (kerámiaszál) falazatú harangkemence

- 3. számú kemence
- Mérés ideje: 1990. 01. 11.
- Maximális térhőmérséklet: $T_{\max} = 850 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Környezeti hőmérséklet a mérés idején: $T_{\text{körny}} = -1 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Hőkezelési idő: 8 h
- Indulás: 12 h 35 min
- Leállítás: 20 h 40 min (állás 5 min műszerjavítás)

I. PEa műszer (1-es diágrampapír)

1/1 [T]°C 70 110 270 10 15 20 30 40 50 60 90 120 140 230 240 240 240

(k) [t] h 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 16.45

1/2 [T]°C 10 10 10 80 120 170 210 240 245 245 300 370 450 600 610 620 620

(b) [t] h 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 16.45

1/3 [T]°C 15 15 60 330 375 400 420 430 440 440 570 660 750 840 855 855 855

(f) [t] h 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 16.45

2/1 [T]°C 90 160 290 10 15 20 30 50 60 70 80 90 100 170 180 180 180

(p) [t] h 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 16.45

2/2 [T]°C 100 150 210 270 320 330 330 360 390 500 640 650 650 650

(z) [t] h 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 16.4

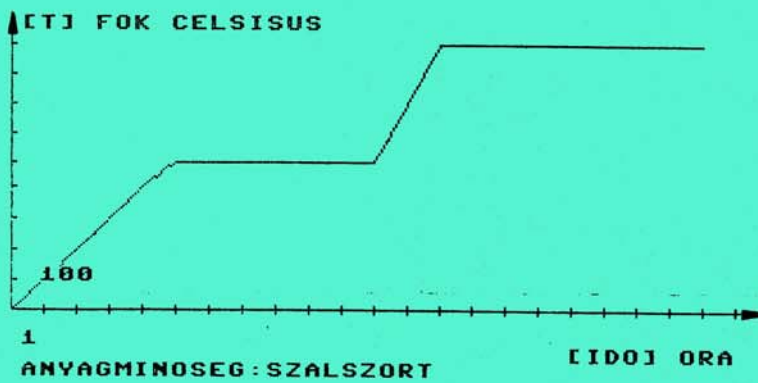
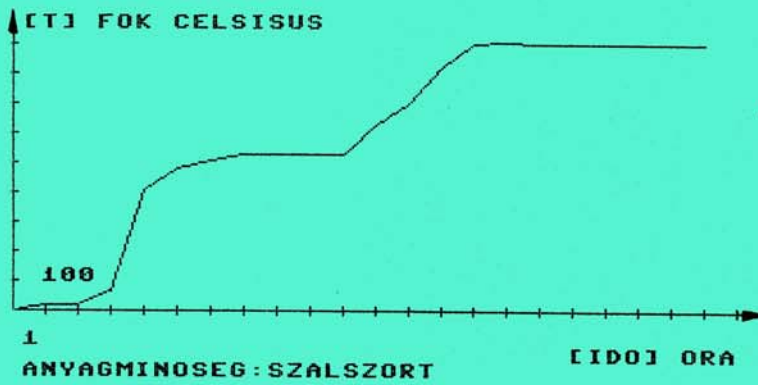
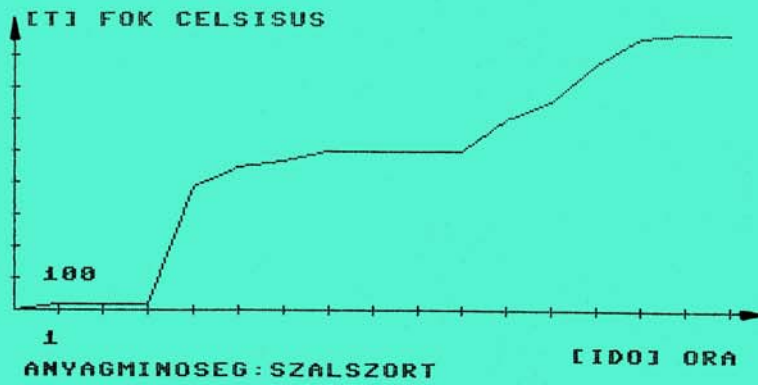
2/3 [T]°C 390 450 470 500 500 500 500 600 660 780 860 870 870 870

(l) [t] h 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 16.4

k=kék, b=barna, f=fekete, p=piros, z=zöld, l=lila

3/1	[T] °C	40	60	90	40	50	60	70	80	90	90	160
(k)	[t] h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3/1	[T] °C	110	120	140	150							
(k)	[t] h	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	21.50
3/2	[T] °C	120	190	320	140	200	260	310	330	350	350	370
(b)	[t] h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3/2	[T] °C	420	510	580	640							
(b)	[t] h	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	21.50
3/3	[T] °C	20	20	70	410	480	510	530	530	530	530	630
(f)	[t] h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3/3	[T] °C	700	820	900	910	900	900	900	900	900	900	900
(f)	[t] h	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	21.50
4/1	[T] °C	50	90	120	100	130	170	230	230	230	230	250
(p)	[t] h	1	2	3	4	5	6	7				
B		9	10	11								
4/1	[T] °C	300	350	400	440	440	440	440	440	440	440	440
(p)	[t] h	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	21.50
4/2	[T] °C	120	190	320	180	240	310	360	360	360	360	440
(z)	[t] h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4/2	[T] °C	510	600	670	700	700	700	700	700	700	700	700
(z)	[t] h	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	21.50
4/3	[T] °C				390	460	490	510	510	510	510	630
(l)	[t] h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4/3	[T] °C	700	820	890	900	890	890	890	890	890	890	890
(l)	[t] h	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	21.50

k=kék, b=barna, f=fekete, p=piros, z=zöld, l=lila



N RETEGU HENGERES FAL

FALAZATVESZTESEGENEK

SZAMITASA

		TB**	
			*
		AB *	
			**TK
		T0	AK
			IT1
S1			
L1			
		DB	
		DK	

K= .756825935 KCAL/MH HOATBOCSAJTASI SZAM

Q= 2023.37062 KCAL/MH FAJLAGOS HOVESZTESEG

H= 2.5 M TENYLEGES HOSSZ

QT= 5058.42654 KCAL/H TENYLEGES HOVESZTESEG

T 0 850 FOKT 1 47.467752 FOK

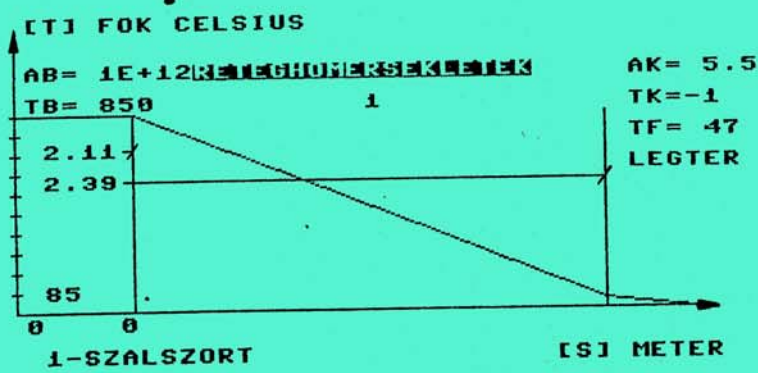
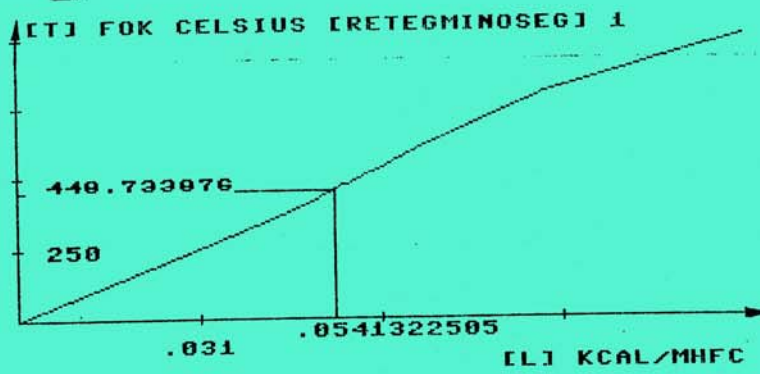
T A 448.733876 FOK ATLAGHOMERSEKLET

TK= 400 FOK LK= .0496 KCAL/MHFC

TN= 600 FOK LN= .0682 KCAL/MHFC

TA= 448.733876 FOK SZAMOLT HOMERSEKLET

LI= .0541322505 KCAL/MHFC SZAMOLT HOVEZETES



N RETEGU SIKFAL

FALAZATVESZTESEGENEK

SZAMITASA

```

|   |   |
TB*** |   |
T0|*  |   |
AB| * |   |
| * |   | |
| ** |   |
| T1|* |   |
|   | * |   |
|   |T2***TK|
|   | IAK |
|   | S1 S2 |
|   | L1 L2 |

```

K= .339805825 KCAL/M2HFC HOATBOCSAJTASI SZAM

Q= 289.174757 KCAL/M2H FAJLAGOS HOVESZTESEG

F= 4.48 M2 TENYLEGES FALFELULET

QT= 1295.50291 KCAL/H TENYLEGES HOVESZTESEG

T 0 850 FOK

T 1 40.3106798 FOK

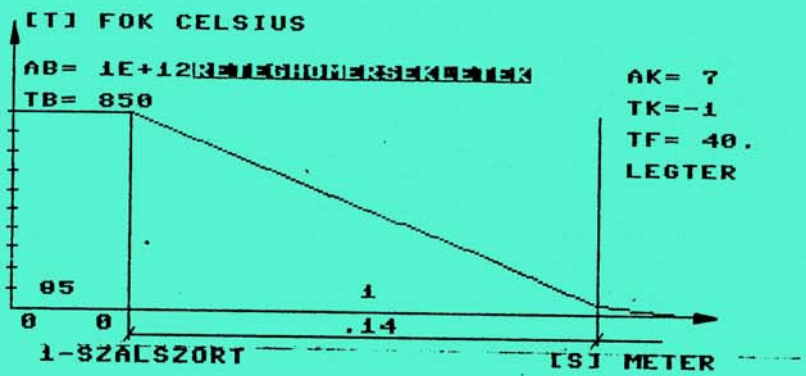
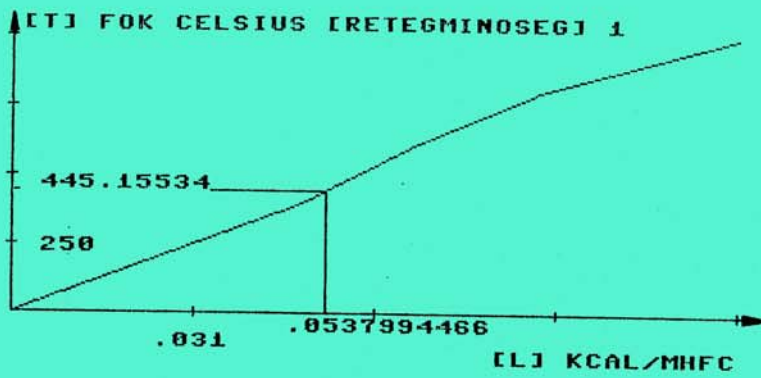
TA 445.15534 FOK ATLAGHOMERSEKLET

TK= 400 FOK LK= .0496 KCAL/MHFC

TN= 600 FOK LN= .0682 KCAL/MHFC

TA= 445.15534 FOK SZAMOLT HOMERSEKLET

LI= .0537994466 KCAL/MHFC SZAMOLT HOVEZETES



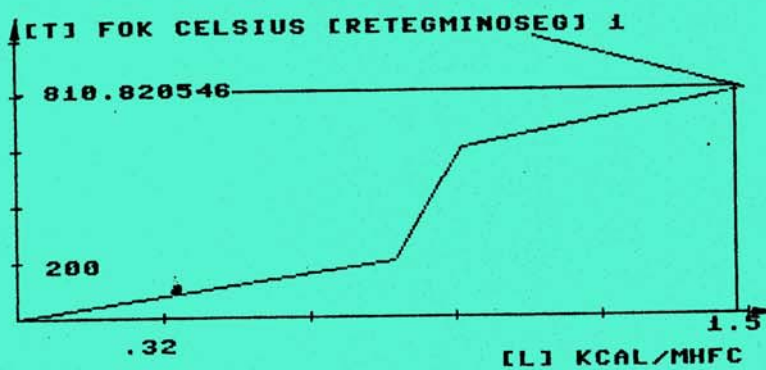
N RETEGU HENGERES FAL

FALAZATVESZTESEGENEK

SZAMITASA



K= 2.40842643 KCAL/MH HOATBOCSAJTASI SZAM
 Q= 6438.91685 KCAL/MH FAJLAGOS HOVESZTESEG
 H= 2.5 M TENYLEGES HOSSZ
 QT= 16097.2921 KCAL/H TENYLEGES HOVESZTESEG
 T 0 850 FOK
 T 1 771.641092 FOK
 T A 810.820546 FOK ATLAGHOMERSEKLET
 TK= 800 FOK LK= 1.6 KCAL/MHFC
 TN= 1000 FOK LN= 1.14 KCAL/MHFC
 TA= 810.820546 FOK SZAMOLT HOMERSEKLET
 LI= 1.57511274 KCAL/MHFC SZAMOLT HOVEZETES



T 2 120.460371 FOK

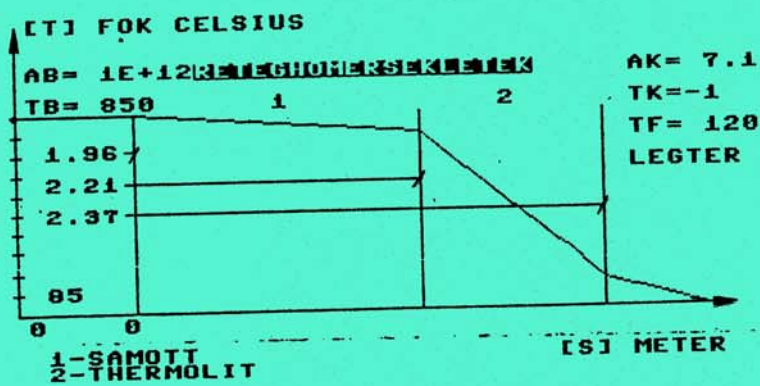
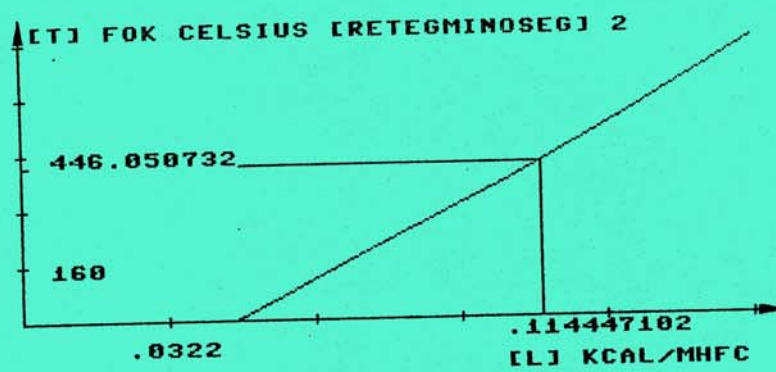
T A 446.050732 FOK ATLAGHOMERSEKLET

TK= 400 FOK LK= .108 KCAL/MHFC

TN= 600 FOK LN= .136 KCAL/MHFC

TA= 446.050732 FOK SZAMOLT HOMERSEKLET

LI= .114447102 KCAL/MHFC SZAMOLT HOVEZETES



N RETEGU SIKFAL

FALAZATVESZTESEGENEK

SZAMITASA

TB***		
T0I*		
ABI *		
	*	
	**	
	T1 *	
		*
		T2***TK
		IAK
	S1	S2
	L1	L2

K= 1.28892037 KCAL/M2HFC HOATBOCSAJTASI SZAM

Q= 1096.87123 KCAL/M2H FAJLAGOS HOVESZTESEG

F= 4.41 M2 TENYLEGES FALFELULET

QT= 4837.20213 KCAL/H TENYLEGES HOVESZTESEG

T 0 850 FOK

T 1 763.22213 FOK

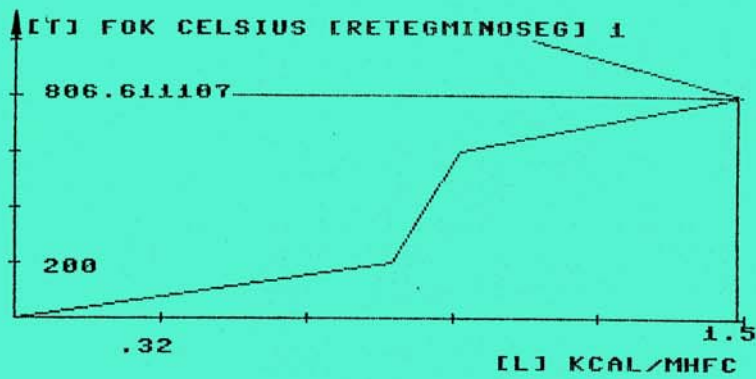
TA 806.611107 FOK ATLAGHOMERSEKLET

TK= 800 FOK LK= 1.6 KCAL/MHFC

TN= 1000 FOK LN= 1.14 KCAL/MHFC

TA= 806.611107 FOK SZAMOLT HOMERSEKLET

LI= 1.58479446 KCAL/MHFC SZAMOLT HOVEZETES



T 2 115.07103 FOK

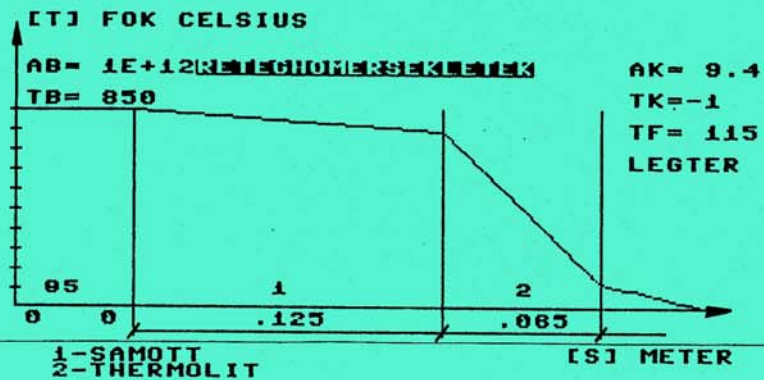
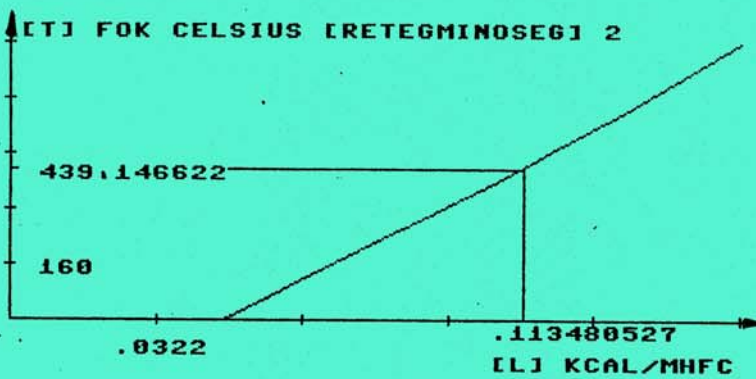
TA 439.146622 FOK ATLAGHOMERSEKLET

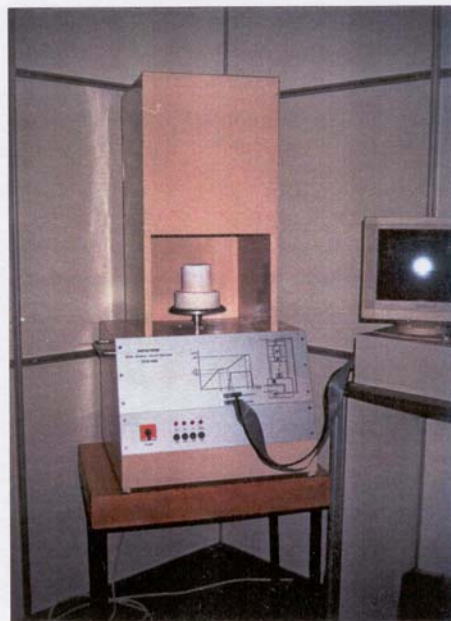
TK= 400 FOK LK= .108 KCAL/MHFC

TN= 600 FOK LN= .136 KCAL/MHFC

TA= 439.146622 FOK SZAMOLT HOMERSEKLET

LI= .113480527 KCAL/MHFC SZAMOLT HOVEZETES





Automatikus betétagolású, személyi számítógép vezérlésű és szabályozású, egyedi tervezésű, vákuumformázott kerámiaszál bélésű, elektromos ellenállás-fűtésű, laboratóriumi, vákuum munkaterű, porcelán hőkezelő kemence fényképe

Kiállítás a Miskolci Egyetem Aulájában, microCAD - SYSTEM '93

Egyrétegű azálkerámia alapanyagú kemencefalazat elektrotechnikai modellje

Alapanyag: RATH, 240 kg/m³ látszólagos tömegsűrűséggel kivilezett vákuumformázott béléstest

Hőellenállás: [R] °C / W

Hőkapacitás: [C] J / °C

Időállandó: [T] s, h

Villamos ellenállás: [R] V / A

Villamos kapacitás: [C] A s / V

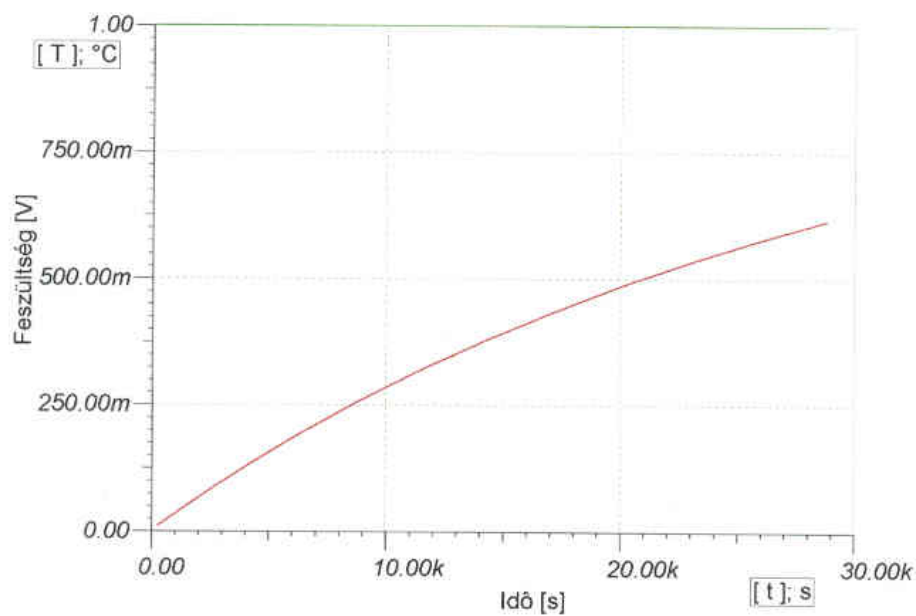
Időállandó: T = R · C, [T] s, h



Átviteli függvény: $Y(s) = Ap / (1 + sT)$

Átmeneti függvény: $h(t) = Ap (1 - e^{-t/T})$

Laboratóriumi porcelán hővezelő kemence felszerkezetének elektrotechnikai modellje

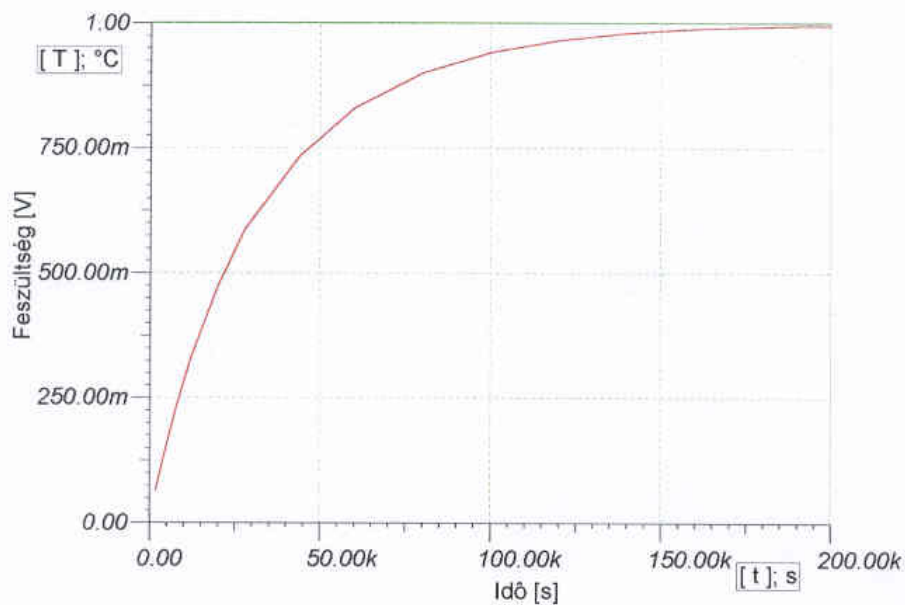


Laboratóriumi méretű, szakaszos üzemű hőkezelő kemence, *egyrétegű szálkerámia alapanyagú, hőálló és egyben hőszigetelő bélésére*, felállított elektrotechnikai modell alapján végzett, tranziens analízis végeredménye.

Az analízist a **TINA** áramkör szerkesztő szoftver alkalmazásával végeztem el.

Az időállandók meghatározása, az értekezés **4. A hőkezelés gazdasági vonzata** című fejezetében található.

Oldalfalszerkezet kialakításának modellezése



Laboratóriumi méretű, szakaszos üzemű hőkezelő kemence, *egyrétegű szálkerámia alapanyagú, hőálló és egyben hőszigetelő bélésére*, felállított elektrotechnikai modell alapján végzett, tranziens analízis végeredménye.

Az analízist a **TINA** áramkör szerkesztő szoftver alkalmazásával végeztem el.

Az időállandók meghatározása, az értekezés **4. A hőkezelés gazdasági vonzata** című fejezetében található.

Oldalfalszerkezet kialakításának modellezése

Egyrétegű szálkerámia alapanyagú kemencefalazat elektrotechnikai modellje

Alapanyag: RATH, 240 kg/m³ látszólagos tömegsűrűséggel kivitelezett vákuumformázott béléstest

Hőellenállás: [R] °C / W

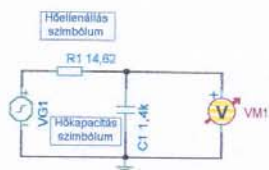
Hőkapacitás: [C] J / °C

Időállandó: [T] s, h

Villamos ellenállás: [R] V / A

Villamos kapacitás: [C] A s / V

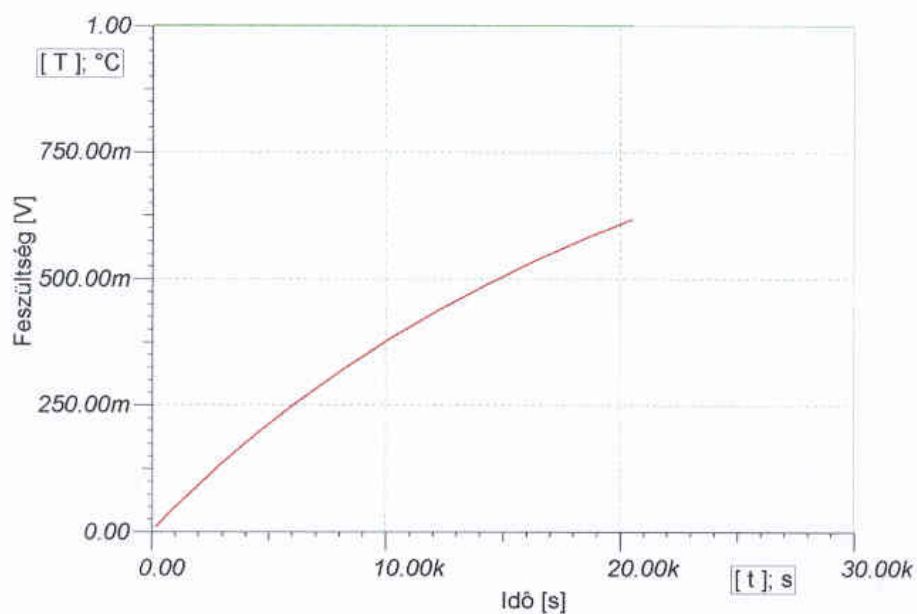
Időállandó: T = R · C [T] s, h



Átviteli függvény: $Y(s) = Ap / (1 + sT)$

Átmeneti függvény: $h(t) = Ap (1 - e^{-t/T})$

Laboratóriumi porcelán hőkezelő kemencés
fodémszerkezetének elektrotechnikai modellje

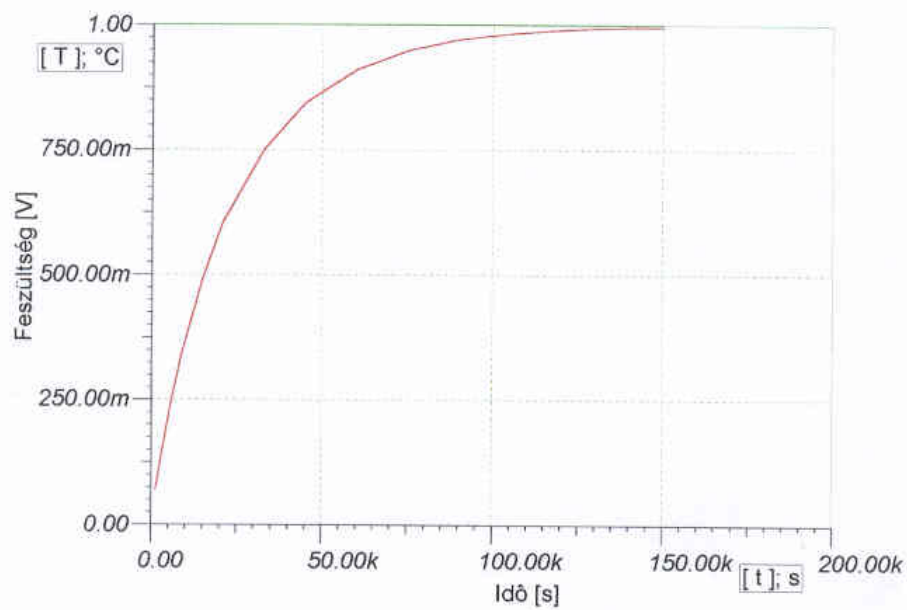


Laboratóriumi méretű, szakaszos üzemű hőkezelő kemence, *egyrétegű szálkerámia alapanyagú, hőálló és egyben hőszigetelő bélésére*, felállított elektrotechnikai modell alapján végzett, tranziens analízis végeredménye.

Az analízist a **TINA** áramkör szerkesztő szoftver alkalmazásával végeztem el.

Az időállandók meghatározása, az értekezés **4. A hőkezelés gazdasági vonzata** című fejezetében található.

Födém szerkezet kialakításának modellezése



Laboratóriumi méretű, szakaszos üzemű hőkezelő kemence, *egyrétegű szálkerámia alapanyagú, hőálló és egyben hőszigetelő bélésére*, felállított elektrotechnikai modell alapján végzett, tranziens analízis végeredménye.

Az analízist a **TINA** áramkör szerkesztő szoftver alkalmazásával végeztem el.

Az időállandók meghatározása, az értekezés **4. A hőkezelés gazdasági vonzata** című fejezetében található.

Födémszerkezet kialakításának modellezése