

**FOLYAMATOS ÜZEMŰ OLVASZTÓ KEMENCÉK BERUHÁZÁSI ÉS  
ÜZEMELTETÉSI KÖLTSÉGÉNEK CSÖKKENTÉSE A  
FALSZERKEZET OPTIMALIZÁLÁSÁVAL  
REDUCTION OF THE INVESTMENT AND OPERATIONAL COSTS AT  
THE CONTINUOUSLY MELTING FURNACES BY OPTIMIZATION  
OF THEIR WALL STRUCTURE**

**SZEMMELVEISZ TAMÁS**NÉ,

**SZŰCS ISTVÁN**

Miskolci Egyetem, Hőenergiagazdálkodási Intézet, Tüzeléstan Tanszék  
tuzszemt@gold.uni-miskolc.hu, tuzsi@gold.uni-miskolc.hu

**JÁRMAI KÁROLY**

Miskolci Egyetem, Anyagmozgatási és Logisztikai Tanszék  
altjar@gold.uni-miskolc.hu  
3515 Miskolc Egyetemváros

Az iparon belül az energiafogyasztás alakulását az alapanyagok előállítás (vegyipar, szilikátipar, cementipar, üvegipar, alumíniumipar és acélipar) ágazatok határozzák meg. A felsorolt ipari ágazatokban működtetett különböző technológiai szerepű és különféle tüzelési rendszerű kemencék energiafelhasználása jelentős. A hazai kemencepark a kedvező változások ellenére is nagyrészt elavult, rossz energia-hatékonyságú, amin feltétlenül változtatni kell. Kutatócsoportunk az ipari kemencék szerkezetének rekonstrukciójával, ezen belül is a kemencék falszerkezetének korszerűsítésére elérhető megtakarítási lehetőségeket vizsgálja. Olyan számítógépes szoftver létrehozása a célunk, amelynek felhasználásával lehetőség nyílik a költségek szempontjából optimális falazatok tervezésére és megépítésére, a technológiai követelmények messzemenő figyelembevételével.

**Kulcsszavak:** tűzálló falazatok, falveszteség, szerkezet optimalizálás

In the industry the dominant branches in the energy consumption are the raw material producers such as chemical, cement, glass, aluminium and steel industry. In these areas the application of furnaces with different firing systems and for different technological role means large energy consumption. The domestic furnaces in spite of some advantageous changes are still out of date, their energy-efficiency is low, necessary to increase them.

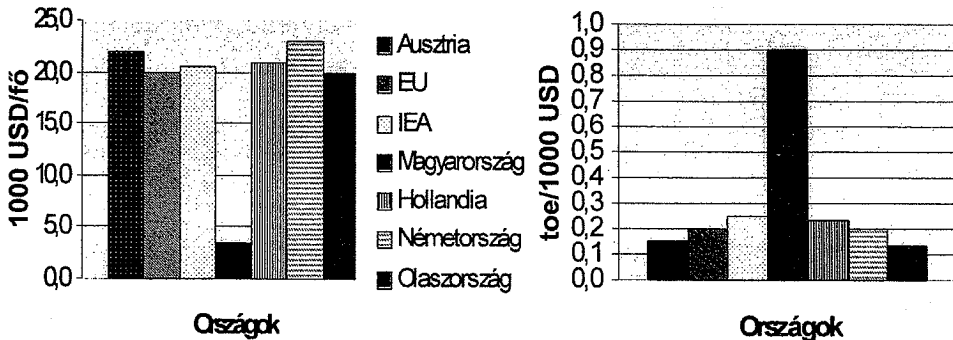
Our research team deals with the modernization of the wall structure of these furnaces, investigates the opportunities of cost savings. We have developed a computer program, which calculates the optimum wall structure due to minimizing both the energy loss and the built in material costs, which are conflicting parts in the objective function, while considering all necessary technological aspects

**Keywords:** refractories, heat loss from walls, structure optimisation

## Bevezetés

Az Európai Unió energiapolitikájának fontos célkitűzése az energiafelhasználás további racionalizálása, ezáltal az energiahatékonyság növelése és a környezet állapotának javítása a tagállamokban.

A magyarországi helyzetet vizsgálva és összehasonlítva egyes EU tagállamok és az EU tagországok átlagos adataival ( 1. ábra ) megállapíthatjuk, hogy hazánkban különösen van mit tenni ezen a területen.



1. ábra Az EU és tagországai, valamint Magyarország gazdasági és energiafelhasználási jellemzői [1]

A hazai energiahatékonyság mintegy harmada az EU országok átlagának. A magyar gazdaság energiahatékonyságának jövőbeni alakulását döntően meghatározza az ipar súlya a GDP termelésben, valamint annak szerkezeti összetétele. A nagy alapanyaggyártó vertikumok fajlagos energiafelhasználása 10-12-szer nagyobb, mint a feldolgozó iparágaké és a szolgáltató szektoré. A nemzetgazdasági szintű fajlagos mutatók javításának kulcstényezője az ipar struktúrájának olyan átalakítása, amelyre a nagyobb jövedelemtermelő, verseny- és ezáltal exportképes termékek előállítását jellemző.

A fentiekből következik, hogy bármely olyan beavatkozás, amely az alapanyaggyártó szektor energiahatékonyságának növekedését eredményezi, nagymértékben hozzájárul az energiapolitikai célok megvalósításához.

Az ipari kemencék energiafelhasználása az ország energiaigényének több mint 15 % -át teszik ki. E berendezések falvesztése a hővesztések jelentős részét, a tüzelőanyag kémiai hőjének 2-15 %-át teszi ki, így a falvesztés csökkentésével a kemencéknél tüzelőanyagot lehet megtakarítani.

Ha sikerül a költségek szempontjából optimális falazatokat terveznünk oly módon, hogy a falazatok élettartalma maximális, a kemence tüzelőanyag felhasználása pedig minimális legyen, akkor a kemencéknél a teljes berendezést

tekintve jelentős költséghányadot képviselő falszerkezet megépítésekor majd azután az üzemeltetés során nagy megtakarításokat érhetünk el.

## 1. A vizsgálatok módszere

### 1.1 A falazattal szemben támasztott követelmények

Az olvadékkal üzemelő kemencék falazatának egyidejűleg számos követelménynek kell eleget tennie, hogy rendeltetésének megfeleljen. Ilyenek a termikus, kémiai és mechanikai igénybevételek. A termikus igénybevétel szempontjából legjellemzőbb tulajdonság a tűzállóság. Tűzállóak azok az anyagok, amelyeknek olvadáspontja  $1580\text{ }^{\circ}\text{C}$  fölötti. Az olvadéknak a munkarétegnél kialakuló maximális hőmérséklete megszabja, hogy milyen tűzállóságú anyag felel meg a technológiának. Fontos tudni, hogy az üvegolvasztás folyamán hogyan alakul a hőmérsékletmező és a hőmérsékletgradiens a tűzállóanyagban [2]. Az üvegipari kemencék falazatának különleges igénybevétele miatt azonban csak a tűzállóság alapján való értékelés nem elégséges. Az üvegolvasztás folyamán ugyanis a hőhatás csak kis része az igénybevételnek. A nagy hőmérsékleti hatásokon kívül a tűzálló falazatnak ellent kell állnia az olvadék, illetve az üveg nyersanyagai vegyi hatásának, az üvegolvadék mechanikai koptató hatásának, továbbá az adagoláskor fellépő üto koptató hatásoknak, az adagoló és kidolgozó nyílásoknál a hőingadozásnak is. Ezek a hatások a tűzálló anyagokat sokkal előbb tönkre teszik, mint a hőhatás. Az üvegipari kemencéknél figyelemmel kell lenni még arra is, hogy a beépített falazó anyagok a gyártás folyamán ne szennyezzék az üvegolvadékat. További követelmény, hogy a falazat kialakításánál fogva irányítsa az anyagáramot, biztosítsa a betétre irányuló hőátadást, minimalizálja a környezeti hőveszteséget, tegyen eleget a munkavédelmi követelményeknek, akadályozza meg a munkahely szennyezését, legyen kellően gáztömör.

Míndezenk figyelembevételével és mérlegelésével a falazatot úgy kell kialakítani hogy a gazdaságossági követelményeknek is megfeleljen, vagyis az amortizációs költség és a hőveszteségek által okozott energiaköltség minimális legyen.

A megfelelő tűzállóanyagok kiválasztásához ismerni kell azoknak a technológia szempontjából fontos

- hőtechnikai paramétereit: tűzállóság, terhelés alatti lágyulás, kúszás, hőlökésállóság, hőtágulás, utólagos térfogatváltozások, hővezető képesség, fajlagos hőkapacitás ;
- mechanikai jellemzőit: hideg és meleg szilárdság, kopásállóság, porozitás, gázáteresztő képesség ;
- kémiai tulajdonságait: salakállóság , savoldhatóság valamint, a,
- bedolgozási költségét és árát.

A rendelkezésre álló falazó anyagok közül - az összeépíthetőség (kompatibilitás) messzemenő figyelembevételével -, válogatva áll össze az az adatbázis, melynek felhasználásával a hőtani és gazdaságossági szempontok figyelembevételével, alkalmas optimáló eljárással a követelményeknek leginkább megfelelő falazat tervezhető és építhető meg.

A fenti jellemzők alapján kiválasztott anyagokról további információkra, referenciákra van szükség, amelyek garantálják, hogy a konkrét esetre vonatkozó technológiai és egyéb igényeknek megfelel az ajánlott tűzállóanyag minősége.

Az optimálás előfeltétele, hogy a tűzálló és hőszigetelő építőanyagok kellően széles választéka álljon rendelkezésünkre a feltétlenül szükséges alkalmazástechnikai és költségadatokkal. A nagy számú adat kezelése csak adatbázissal lehetséges.

Az adatbázis összeállításánál szem előtt tartottuk, hogy az alapvetően eltérő beépíthetőségű anyagoknál más és más jellemzők kerülnek előtérbe. E megfontolás alapján a téglá, a massa és a szálal anyagokra külön állítottuk össze az adatbázist, melyek információtartalma hasonló, de tükrözi a már említett differenciálást is.

Az általunk összeállított adatbázis jelenleg több mint 60 féle tűzálló és hőszigetelő anyag fentebb felsorolt adatait tartalmazza. Folyamatos bővítését nemcsak az új anyagok megjelenése, de az optimálás szempontjai is indokolják.

## 1.2 Az optimálás módszere, a célfüggvény

A falazat optimalizálása a költségek minimumának meghatározását jelenti. A falazattal összefüggésben alapvetően kétféle költség merül fel :

- a falazat létesítésének költsége, amely a felhasznált anyag árától és az építés költségétől, valamint a javítási és karbantartási ráfordításoktól függ;
- az üzemelő kemence falazatán keresztül a környezetnek átadott energia, valamint az üzemmódtól függően a falazatban tárolt energia költsége.

Az optimalizáláshoz meg kell alkotni azt a célfüggvényt, amelynek szélsőértéke adja az optimumot [3] . Ennek általános alakja a következő:

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{x_i (P_i + L_i)}{t_a} + \varphi t_{\text{évi}} P_{\text{tüz.a}} \frac{3600}{H_u}$$

ahol:  $K$  - a kemence egységnyi felületének egy évre eső fajlagos költsége, Ft/a m<sup>2</sup>;

$n$	- a falazati rétegek száma,	
$x_i$	- az $i$ -edik réteg vastagsága,	$m$ ;
$P_i$	- az $i$ -edik réteg anyagának ára,	$Ft/m^3$ ;
$L_i$	- az $i$ -edik réteg bedolgozási költsége,	$Ft/m^3$ ;
$t$	- a kemence amortizációs ideje,	$a$ ;
$t_{\text{évi}}$	- a kemence évi üzemideje,	$h/a$ ;
$P_{\text{tüz.a}}$	- a tüzelőanyag ára,	$Ft/m^3$ ;
$H_u$	- a tüzelőanyag fűtőértéke,	$MJ/m^3$ ;
$\varphi$	- a falazat hővesztesége,	$W/m^2$ ;

A többretegű sík fal felület és időegységre vonatkozó hővesztesége:

$$\varphi = \frac{T_b - T_k}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha}}$$

ahol:	$T_b$	- a falazat belső hőmérséklete,	$K$ ;
	$T_k$	- a környezet hőmérséklete,	$K$ ;
	$\alpha$	- a falazat és a környezet közötti összesített hőátadási tényező,	$W/m^2K$ ;
	$\lambda_i$	- az $i$ -edik réteg hővezetési tényezője a réteg hőmérsékletén,	$W/mK$ .

A fenti költségfüggvény optimumát az aktuális feladathoz tartozó kezdeti és peremfeltételek meghatározása után számíthatjuk.

Kezdeti és peremfeltételek:

- a rétegek száma;
- a rétegvastagságok minimuma és maximuma;
- a belső és külső hőmérsékletek;
- az egyes rétegek megengedett maximális hőmérséklete.

### 1.3 Az optimáló eljárás, a Rosenbrock-féle Hillclimb algoritmus

Az optimáló eljárás maximalja az  $y=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$  függvényt, a következő feltételek esetén :

az explicit feltételek:  $X_i^L \leq X_i \leq X_i^U \quad i=1, 2, 3, \dots, N$

az implicit feltételek:  $X_i^L \leq X_i \leq X_i^U \quad i=N-1, N-2, \dots, N-M$

ahol :

$M$  - az implicit feltételek száma;  
 $X_i^L, X_i^U$  - az alsó és felső határérték.

A célfüggvény többváltozós, nemlineáris, a méretezési feltételek pedig nemlineáris többváltozós, egyenlőtlenségi feltételek,  $N$  a változók száma (explicit változók),  $M$  a feltételek száma (implicit változók). Az explicit változók a szerkezet fizikai-geometriai paraméterei lehetnek (rétegvastagság, hővezetési tényező stb.). Ezért is lényeges az  $X_i \geq 0$  egyenlőtlenség, amely csak pozitív értékeket enged meg a változókra. A program megkeresi a célfüggvény extrémumát a feltételek teljesülése estén. Az extrémum általában a minimális tömeget, minimális költséget, maximális megbízhatóságot jelenti. Az implicit változók  $X_{N+1}, \dots, X_{N+M}$  függvényei az explicit független változóknak. Az eljárás *Rosenbrock* [4] kereső módszerén alapul. A koordináta-rendszer forgatásán alapuló módszer a *Hooke-Jeeves* algoritmus továbbfejlesztésének tekinthető. Az algoritmus a koordináta-rendszert forgatja a minimálás minden egyes lépésében olyan módon, hogy az első irány a célfüggvény-felület legmeredekebb változása felé mutat, a többi irány pedig merőleges az első irányra.

Az algoritmus tengelyforgatással meghatározza az  $M_{ij}$  irányokat, a következő egyenletekkel:

$$M_{ij}^{(k+1)} = \frac{D_{ij}^{(k)}}{\sqrt{\sum_j [D_{ij}^{(k)}]^2}}$$

ahol:

$$D_{ij}^{(k)} = A_{ij}^{(k)}$$

$$D_{ij}^{(k)} = A_{ij}^{(k)} - \left[ \sum_{i=1}^{j-1} \left[ \sum_{n=1}^j M_{nj}^{(k+1)} \cdot A_{nj}^{(k)} \cdot M_{ij}^{(k+1)} \right] \right]$$

$$A_{ij}^{(k)} = \sum_{i=j}^N d_i^{(k)} \cdot M_{ij}^{(k)} \quad j = 2, 3, \dots, N$$

a fenti összefüggésben :

- $i$  - a változók indexe ( $i = 1, 2, \dots, N$ );
- $j$  - az irányok indexe ( $j = 1, 2, \dots, N$ );
- $M_{ij}$  - normalizált irányvektor komponens ;
- $D_{ij}$  - az irányvektor régi komponense ;
- $d_i$  - a lépéstávok összege az  $i$  - irányban, a legutóbbi forgatás óta ;
- $k$  - állapot index.

Az algoritmus ezután elvégzi a vizsgálatokat az összes irányban, az új koordinátatengelyek felhasználásával, majd a változók kerekítetlen értékeit javítja mindaddig, amíg a konvergencia kritérium nem teljesül.

#### ***2.4 Az optimáló számítógépes program***

A folyamatosan fejlesztés alatt álló program a megvalósítási költségek ( anyag és beépítési ) mellett a hőveszteség költségét veszi figyelembe adott rétegekombinációk esetén. A program interaktív, felhasználóbarát kialakítású, a különböző rétegszámú falazat minimális költségre történő optimalizálását végzi.

A program változtatható alapadatok (energiahordozó ára, amortizációs idő...stb.) mellett számítja a minimális költséghez tartozó rétegvastagságokat a falazatnál, annak belső és külső hőmérséklete ismeretében. Peremfeltételként számításba vesszük az egyes rétegeknél alkalmazható maximális hőmérsékletet, a rétegek minimális és maximális vastagságát, a falazat maximális és minimális összes vastagságát is.

A kemence működése során a falazatot érő hatások számbavétele után a tűzálló és szigetelőanyagok adatbázisából a követelményeknek megfelelőket kiválasztva végezzük az optimáló program futtatását.

### **3. A vizsgálatok eredménye, üvegyipari olvasztókemence falszerkezetének optimalizálása**

Az üvegyártás legfontosabb technológiai berendezése az olvasztó kemence. Hazánk üvegermelése 500 ezer t/év, melynek 80 %-át a csomagolóüvegek és síküvegek teszik ki. Az üvegolvasztó kemencék két legfontosabb típusa a fazekas kemencék és a kádkemencék. A fazekas kemencéket diszműüveg, optikai üveg és különleges üvegek gyártásához alkalmazzák. A nagyipari üvegyártás olvasztóberendezései a kereszttüzelésű kádkemencék.

Az üvegolvasztó kemencéknél a falazaton át a környezetbe távozó hőveszteség a tüzelőanyaggal bevitt hőnek mintegy 15 % - át teszi ki .

A Miskolci Üvegyárban működő kádkemence paramétereinek felhasználásával bemutatjuk egy olvadékkal üzemelő kemence falszerkezetének optimalizálása során kapott eredményeket.

A kádkemence 4 zónára, olvasztó, homogenizáló, átfolyó és kidolgozó zónára osztható. A falszerkezet legnagyobb hőveszteségeit az oldalfalak és a boltozatok okozzák. E falrészekre három réteget tervezve végeztük el az optimalizálást.

A vizsgált berendezésre vonatkozó alapadatok:

- éves üzemidő 8000 óra ;

- a rétegek száma három, melyek minimális és maximális vastagsága:

$$x_{1\min} = 50 \text{ mm}$$

$$x_{2\min} = 0 \text{ mm}$$

$$x_{3\min} = 50 \text{ mm}$$

$$x_{1\max} = 550 \text{ mm}$$

$$x_{2\max} = 350 \text{ mm}$$

$$x_{3\max} = 550 \text{ mm}$$

- a hőátadási tényezőt szakirodalomból határoztuk meg (1. táblázat);

- a kemence amortizációs időtartamát négy évre választottuk;

- tüzelőanyag földgáz, melynél a mindenkori aktuális árat és fűtőértéket vettük figyelembe .

A számítások során az anyagköltség a tűzálló és szigetelő anyagok árából és beépítési költségükből állt. Az alkalmazott anyagok árai az érvényben lévő árak közelítő értékei, mivel ezek konkrét esetekben piaci alku tárgyat képezik. A bedolgozási árakat az anyagár 25 %-ként vettük figyelembe, mert ezen költség az anyagok fajtájától függően változik .

A futtatásokhoz szükséges további technológiai alapadatokat az 1. táblázat, a futtatások eredményeként optimálisnak adódott falszerkezet tűzálló és szigetelőanyagainak főbb jellemzőit és árát a 2. táblázat tartalmazza.

1. táblázat Üvegolvasztó kemence technológiai zónánkénti hőmérséklete és hőátadási tényezői

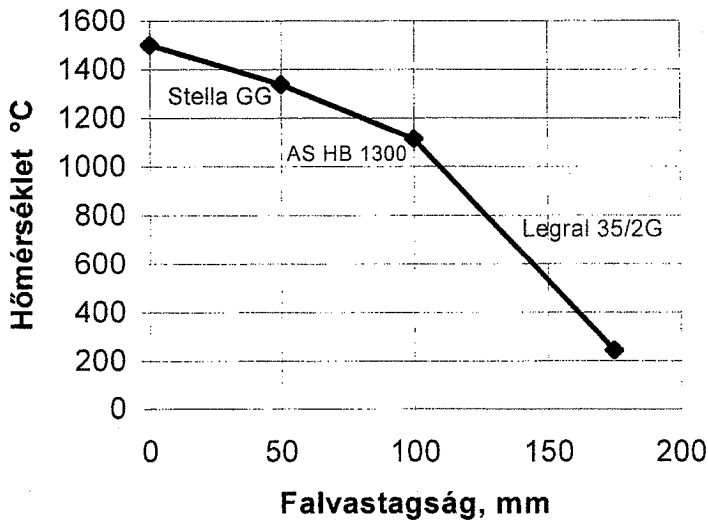
Technológiai zóna	$T_{\text{fal belső}}$ [°C]	$T_{\text{fal külső max}}$ [°C]		Hőátadási tényező [W/m <sup>2</sup> K]	
		oldalfal	boltozat	oldalfal	boltozat
Olvasztó	1500	70	250	13,98	11,60
Homogenizáló	1400	70	150	13,41	11,42
Átfolyó	1000	70	150	13,30	11,30
Kidolgozó	1100	70	150	13,37	11,38



2. táblázat Az optimális falszerkezetet alkotó tűzálló és hőszigetelő anyagok néhány fontos jellemzője és ára

Minőség	ZRO	GEH	STELLA GG	AS-HB 1300	Legral 35/2G
alkalmazási hőmérséklet [ $^{\circ}\text{C}$ ]	1700	1690	1650	1350	1350
sűrűség [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2800	1820	1820	1900	1250
hővezetési tényező [ $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ ]					
400 $^{\circ}\text{C}$ -on	2,50	1,40	1,40	0,64	0,45
700 $^{\circ}\text{C}$ -on	2,00	1,46	1,50	0,68	0,46
800 $^{\circ}\text{C}$ -on	2,00	1,56	1,60	0,71	0,48
1000 $^{\circ}\text{C}$ -on	2,00	1,70	1,70	0,77	0,52
1200 $^{\circ}\text{C}$ -on	2,20	1,92	2,10	0,79	0,57
1400 $^{\circ}\text{C}$ -on		2,10	2,70		
ár [Ft/t]	650 000	156 000	354 900	70 000	299 900
ár [Ft/ $\text{m}^3$ ]	1 820 000	283 920	644280	133 000	374 875

A számítások eredményei közül példaként az olvasztózóna boltozatában kialakuló hőmérsékletet a rétegvastagság függvényében ábrázoltuk a 2. ábrán.



2. ábra Az olvasztó zóna boltozatában kialakuló hőmérséklet

Az optimáló program futtatását az adatbázisban rendelkezésre álló falazó anyagok különböző variációira az oldalfalakra és a boltozatokra mind a négy technológiai zónában négyféle falszerkezetre végeztük el. A költségek szempontjából optimális falszerkezet adatait a 3. táblázatban foglaltuk össze.

3.táblázat Az üveglvasztó kemence optimális falszerkezete és annak költségei

Falazat típusa	Technológiai zóna	A réteg falazóanyagai	Rétegvastagság [mm]	Összes költség [Ft/m <sup>2</sup> év]
Boltozat	olvasztó	Stella GG AS-HB 1300 Legral 35/2G	50 50 75	598 524
	homogenizáló	GEH AS-HB 1300	50 100	536 865
	átfolyó	ZRO AS-HB 1300	50 75	384 165
	kidolgozó	ZRO AS-HB 1300	50 75	422 101
Fürdő feletti oldalfal	olvasztó	ZRO AS-HB 1300	50 75	427 388
	homogenizáló	ZRO AS-HB 1300	50 75	462 276
	átfolyó	ZRO AS-HB 1300	50 75	330 026
	kidolgozó	ZRO AS-HB 1300	50 75	364 358

A futtatásokhoz csak olyan falszerkezeteket terveztünk, amelyek a technológiai követelményeknek megfelelnek és ezek közül optimáltuk a költségek szempontjából legkedvezőbbet. A szoftver sikeres alkalmazásának feltétele, hogy mind a gyártási technológiában, mind a kemenceépítésben nagy szakmai gyakorlattal rendelkező szakember használja.

A 2. ábra igazolja az előzetesen kikötött feltételek teljesülését vagyis azt, hogy az egyes rétegekben kialakuló hőmérséklet és a boltozat külső felületi hőmérséklete nem haladja meg az adott tűzállóanyagra vonatkozó alkalmazhatósági hőmérsékletet és a fal külső felületére megszabott maximális hőmérsékletet.

Az optimális falazat megépítésével a kemence éves üzemelési költsége 12 %-al kisebb, mint a hasonlóan korszerű anyagokból összeállított, legdrágább megoldás.

Összehasonlításként lefuttatva az üzemelő kemence eredeti falszerkezetére a programot, közel 60 %-os megtakarítás érhető el az optimális szerkezet megépítésével.

#### 4. Összefoglalás

Az ipari kemencéknél a teljes berendezést tekintve a tűzálló és hőszigetelő anyagok magas ára miatt a falszerkezet igen jelentős költség hányadot képvisel. Ez a tény is motiválja, hogy a gépiparban már régóta elterjedten alkalmazott szerkezetoptimalás adaptálásával, tapasztalatai felhasználásával olyan módszert alkalmazunk amellyel lehetőség van a költségek szempontjából optimális falazatok tervezésére és megépítésére a technológiai igények messzemenő figyelembevételével.

A bemutatott példa is igazolja, hogy a falazat tervezésében, számításában jelentős anyagi és időbeli megtakarítást lehet elérni a számítógéppel végzett optimalással. A folyamatos üzemű kemencéknél, amelyek egy részénél a falazatot hosszabb időre, esetleg évekre tervezik feltétlenül megtérülő gazdaságos beruházás az átépítés.

Az olvadékkal üzemelő kemencéknél akár folyamatos, akár szakaszos üzemű a berendezés két falazatátépítés között az erős vegyi hatások miatt károsodó falrészeket karbantartó javításokkal kell üzemképes állapotban tartani. Ezek a beavatkozások mind a kiesett termelés, mind a tetemes javítási költségek okán nagyban befolyásolják a kemencék üzemének gazdaságosságát. Munkánk folytatásaként szoftverünket tovább kívánjuk fejleszteni a karbantartó javítások optimalálására is.

#### Irodalom

- [1] Szalóki András: Energia másként Energiagazdálkodási Kézikönyv 12-13 Energia Központ Kht. Budapest, 1999.
- [2] Palotás Á. B., Szűcs, I., Hegman N.: Investigation and mathematical modeling of a furnace wall deterioration. Freiburger Forschungshefte, A 865 Energie 2001., Freiberg, pp: 75-84. ISBN: 3-86012-146-4.
- [3] Szemmelveiszné Hodvogner K., Szűcs I., Réz I., Jármai K.: Kemencék tűzálló falszerkezetének optimalizálása, *Energiagazdálkodás*, Budapest, Vol. 40. No. 4. 1999, p: 29-35. ISSN 0021-0757
- [4] Farkas J., Jármai K.: Analysis and optimum design of metal structures. Balkema Publishers, Rotterdam, Brookfield, 1997, p: 347 ISBN 90 5410 669 7.