
(Fugt projekt)

Arbetsrapport SGC A09

**NATURGAS/MIKROVÅGSTEKNIK
FÖR SINTRING AV KERAMER**

Anders Röstin
Institutionen för Energiteknik
KTH, Stockholm

Maj 1996



MICROWAVE ASSISTED GAS FIRING

**EXAMENSARBETE FÖR
SYDKRAFT ELFÖRSÄLJNING AB
SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB**

**ANDERS RÖSTIN, KTH
MAJ 1996**

Erk9605/1

SYDKRAFT
ELECTRICITY TRADING AND ENERGY SERVICES



**KUNGL
TEKNISKA
HÖGSKOLAN**

Department of Energy Technology
Chair of Heat and Power Technology
Professor: Torsten H. Fransson

Title Microwave Assisted Gas Firing

Author Anders Röstin

Report No 498

Project Diploma thesis

Pages 24

Drawings 14

Supervisor KTH: Torsten H. Fransson

Date 96-05-08

Appendices 0

Overall responsible at KTH: Torsten H. Fransson

Overall responsible at industry: Rune Eriksson and Hans-Åke Maltesson

Approved at KTH by: Torsten H. Fransson

Signature:

Industrial partners: Sydkraft Elförsäljning AB and Svenskt Gastekniskt Centrum AB

Approved by industrial partners: Rune Eriksson, SEFAB

Signature: *Rune Eriksson*

Approved for distribution:

Restricted, to distribution list below:

X

Open:

Abstract

This paper describes an innovative firing technology, called Microwave Assisted Gas Firing (MAGF) which is under development at EA Technology., UK. The purpose of the report is to give a general introduction to the technology. Primarily for the ceramic industry.

The Microwave Assisted Gas Firing is a multiclient project to transfer the technology in ceramic industry.

The aim of the MAGF is to improve the sintering step in ceramic processing.

Today the majority of ceramic components are fired in kilns with a radiant heat source, typically gasburners or electrical resistance elements. By using Microwave Assisted Firing one has the advantage of two different heat transferring mechanisms. Heat from the radiant source is transferred to the surface of the product and then passed through the ceramic by thermal conduction. Simultaneously, the microwave generator applies volumetric heat within the ceramic product.

The objective of the MAGF is:

- Reduce the thermal stresses, due to thermal gradients, in the product.,
- Allow faster firing.
- Save energy.
- Improve mechanical and material properties.

At present EA Technology have a range of kilns available, from small laboratory kilns to a pilot production microwave-assisted gas shuttle kiln, capable of firing 1000 kg (1m³). During 1996 a 15 meter tunnel kiln will be assembled and commissioned. In these kilns both laborative and fully scaled sintering trials are undertaken.

The majority of the results from the trials are restricted to the members of the consortium. From the official results the report concludes:

- The firing rate is increased by at least a factor of four replacing conventional firing with MAGF.
- Energy cost savings for the sintering step with about 50%.
- Enhanced binder removal.

The paper does not conclude weather the MAGF technology will give increased efficiency in industrial production. Until today there are to few applicable trials made for such a conclusion. A further study is recommended.

Distribution list

Prof. Torsten H. Fransson	KTH	1			
Rune Eriksson	SEFAB	1			
Hans-Åke Maltesson	SGC AB	1			
Circ. / Library HPT	KTH	2			
Extra		5			

SAMMANFATTNING

Microwave Assisted Gas Firing (MAGF) är en ny bränningsteknologi för keramer. Den är utvecklad av ett brittiskt företag, EA Technology, under det senaste decenniet.

Idag använder de flesta industrier strålningsvärme från gas, olja eller elektricitet vid sintring av keramer. Värmetransporten sker med strålning fram till, och med ledning i produkten. Eftersom keramer leder värme dåligt måste man låta upphettningen ske långsamt för att undvika temperaturdifferenser i godset. Med MAGF assisteras den traditionella uppvärmningstekniken av volymetrisk mikrovågsenergi som når det inre av produkten. Följden av detta är minskade temperaturgradienter och därav minskade materialspänningar.

Försöken med *Microwave Assisted Gas Firing* utförs i små experimentugnar samt i en 1 m³ stor pilotugn. Under färdigställande är en 15 m lång tunnelugn. I testerna deltagar ett 30-40 tal intressenter från utrustningstillverkare och främst slutanvändare i keramikindustrin. Medlemmarna i konsortiet betalar en avgift för varje försök (totalt 3 st). De som genomför alla tre stegen får sedan licensfritt utnyttja teknologin. Konsortiet är fortfarande öppet för nya deltagare.

Resultaten från pilotanläggningen är till största del förbehållna de deltagande företagen. Endast ett fåtal resultat finns att tillgå. Bland dessa finns ett jämförande experiment mellan traditionell sintring och MAGF för zirkoniumdioxid, vilket är ett mycket unikt kerammaterial. Dessutom har EA Technology givit ut ett antal allmänna resultat utan att ange exakt vilka material som används.

Testerna med zirkoniumdioxid har visat att sintringsprocessen dramatiskt förändras med MAGF. Krypningen av materialet (dvs sintringen) sker vid en lägre temperatur. Det krävs ca. 80-100 °C lägre temperatur än vid användande av konventionell teknik. Dessutom blir den slutgiltiga krympningen större vid användande av MAGF.

Utifrån de allmänt redovisade resultaten kan man göra följande generella påståenden om MAGF:

- Sintringstiden reduceras som lägst med en faktor fyra.
- Energikostnaden reduceras med ca. 50% för bränningssteget.
- Kvaliteten och de mekaniska egenskaperna förbättras

Ur dessa resultat kan man dra ett antal slutsatser.

Om de första två påståendena även gäller vid uppskalning, till tunnelugnen och övriga fullskaliga ugnar, skulle den traditionella keramiska industrin ha stor nytta av MAGF. En mycket stor del av produktionskostnaden är för dem energin. Det skulle dessutom innebära minskad miljöpåverkan.

Det sista, något vagare resultatet, kan innebära en dramatisk förändring för tillverkarna av olika konstruktions- och funktionskeramer (avancerade keramer). Om man kan uppnå förbättrade materialegenskaper skulle helt nya produkter kunna tillverkas. Den idag snabba utvecklingen av kerammaterial skulle med MAGF kunna få ytterligare fart.

Den här rapporten speglar bara de inledande försöken som gjorts med MAGF och ett fortsatt arbete med de framtida resultaten är nödvändigt innan ett ställningstagande kan göras.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

NOMENKLATUR	1
1. INLEDNING	2
1.1 Bakgrund	2
1.2 Metodik	2
1.3 Målsättning	2
2. BAKGRUND	3
2.1 Keramer	3
2.2 Värmebehandlingsprocessen	4
2.3 Mikrovågor	5
2.4 Mikrovågor i keramer	6
3. MICROWAVE ASSISTED GAS FIRING	8
3.1 Inledning	8
3.2 Forskning vid EA Technology, Storbritannien	8
3.3 Mikrovågsassisterad sintring	9
3.4 Provanläggningen vid EA Technology	10
3.5 Experiment	11
3.6 Resultat	12
3.6.1 Zirkonindioxid	12
3.6.2 Allmänt	15
3.7 Konsortiet, bildat för MAGF-försök vid EA Technology	18
4. DEN SVENSKA MARKNADEN	19
4.1 Inledning	19
4.2 Traditionell keramisk industri	19
4.3 Materialforskningsindustrin	20
4.4 MAGF-utvecklingen i Sverige	20
5. SLUTSATSER	21
6. FORTSATT ARBETE	23
7. REFERENSER	24

NOMENKLATUR

E	Elektriskt fält	(V/m)
f	Frekvens	(Hz)
ϵ	Förlustfaktor	(-)
x, y, z	Avstånd	(m)
t	Tid	(s)

MAGF Microwave Assisted Gas Firing

MAF Microwave Assisted Firing

Övrigt är angivet i texten.

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Det brittiska företaget EA Technology har under flera år arbetat med att kombinera traditionell strålningvärme med volymetrisk mikrovågsenergi vid bränningen av keramer. Forskningen och försöken har varit framgångsrika och idag är ett stort antal intressenter involverade i tekniken. Pilotanläggningen för *Microwave Assisted Gas Firing* (MAGF) finns i Capenhurst, England.

De flesta keramikindustrierna i Sverige använder idag beprövad teknik med gasbränning, som inte genomgått några större förändringar under de senare decennierna. Ugnar och övrig utrustning har en mycket lång livslängd och byts ut med långa tidsintervaller.

Den här rapporten beskriver MAGF-tekniken och dess tillämpningsområden.

Inledningsvis ges en kort beskrivning av förutsättningarna för mikrovågsassisterad sintring. Därefter består huvuddelen av rapporten av en teknisk beskrivning av MAGF och de resultat som uppnåtts vid EA Technology. En liten del av uppnådda förbättringar av produktion och prestanda belyses.

I den senare delen av rapporten redogörs för möjligheterna till att delta i tester, och eventuella fortsatta studier som bör göras.

1.2 Metodik

Informationssökningen under arbetet har främst baserats på material från EA Technology. En mindre litteratursökning och ett stort antal kontakter med personer involverade i keramikbranschen har använts för att komplettera företagets information om MAGF.

Rapporten har skrivits utan att göra grundläggande litteraturstudier i materiallära eller mikrovågsteori.

I mitten av december gjordes ett studiebesök på pilotanläggningen i Capenhurst. Där gavs det möjlighet till att få en överblick av de olika komponenterna i processen. Därefter har ett flertal kontakter med EA Technology tagits.

Begränsningen i rapporten är mycket klar, då all information om MAGF tekniken har baserats på företagets uppgifter. Eftersom mycket lite är publicerat och det flesta av erfarenheterna och resultaten är förbehållna de i konsortiet (kap. 3.7) deltagande företagen, utgör detta en betydande avgränsning av studien. Rapporten bör läsas med denna förutsättning.

Kontakter med dussintalet nyckelpersoner i svensk keramikindustri har tagits för att inventera behovet av MAGF och för att få allmänna synpunkter på tekniken. En mindre enkätundersökning har legat till grund för dessa telefonintervjuer.

1.3 Målsättning

Målet med arbetet är att beskriva *Microwave Assisted Gas Firing* ur ett tekniskt och ekonomiskt perspektiv. Tonvikten i rapporten har lagts på att underlätta för en mer detaljerad studie av tekniken och försöken. Innehållet i rapporten utgör inget beslutsunderlag, utan skall ses som en allmän beskrivning av MAGF tekniken.

2 BAKGRUND

2.1 Keramer

Till gruppen keramer hör alla oorganiska material som icke är metalliska [1]. Dessa kan indelas i de fyra kategorierna:

- Smältbaserade (Glas, glaskeramik, natursten)
- Sintrade (Traditionell och avancerad keramik)
- Cementbaserade (Betong, natursten, övriga material)
- Keramskikt (Glasyrer/emaļjer, termiskt sprutade, förångade och vätskebaserade skikt)

Till sintrade keramer räknas de flesta material vi vanligtvis kallar keramiska. (Exempelvis kallar vi inte glas för keram, trots att det egentligen är det.) Framställning av keramer sker i ett antal processteg. Efter beredningen av råmaterialet förformas en pulverkropp som upphettas till en hög temperatur, så att pulverpartiklarna binds (sintras) till varandra. Därefter kyls produkten. På grund av porer i pulverkroppen krymper materialet alltid vid sintringen, slutresultatet blir ett fast material.



Fig. 2.1.1 Principiellt processförlopp för sintrade keramer.

I traditionell keramik ingår vanligtvis tre typer av råmaterial: Kaolin och/eller andra leror, Fältspat samt Kvarter, medan de modernare konstruktions- och funktionskeramerna innehåller andra ämnen. Konstruktionskeramerna kan exempelvis innehålla kiselnitrid, kiselkarbid eller zirkoniumoxid för att få bra mekaniska, termiska och kemiska egenskaper. Idag tillverkas och testas många av dessa och andra material i tillämpningar med mycket höga krav på prestanda. Inte minst i applikationer med mycket höga temperatur- och korrosionskrav, som brännarmunstycken och värmväxlare blir keramiska material allt viktigare.

Slutproduktens utseende och precision avgörs av hur noggrant förformningen har utförts. Metoderna för att forma godset är pressning, sprutning, extrudering eller casting. Eftersom keramen krymper vid sintringen måste hänsyn tas till detta vid förformningen. Ofta måste man även beakta att kroppen inte krymper uniformt och att toleranskraven för slutprodukten kan vara i storleksordningen μm . För att formningen av godset skall vara möjlig måste man tillsätta något hjälpmedel, som före eller under bränningen avlägsnas. I det enklaste fallet kan det vara vatten som torkas bort.

Vid bränningen av godset fogas pulverpartiklarna samman till ett homogent material (sintring). Genom att under en, beroende på grundmaterial, bestämd tid värma upp kroppen till en viss temperatur ($> 600\text{ }^\circ\text{C}$) och därefter låta svalningen ske styrs sintringen. För att eliminera antalet porer i materialet, och därmed öka styrkan kan flera olika sintringstekniker användas, bland annat är olika former av trycksintring (sk hotpressing) vanliga.

Efter ugnen återstår utsortering av kassationer och sortering av kvaliteter. Därefter kan godset bearbetas efter önskemål. De flesta produkterna skall ytbehandlas genom slipning eller/och glaseras.

Användningen av keramer har de senaste åren ökat dramatiskt och nya användningsområden upptäcks kontinuerligt. [Bilaga 1] Det är som nya konstruktionsmaterial vi kommer att se keramiska tillämpningar i framtiden. Vissa funktionsbetingade tillämpningar, där keramens optiska, elektriska eller magnetiska egenskaper är betydelsefulla kommer även att bli viktiga.

2.2 Värmebehandlingsprocessen

När produkterna är förformade och bindemedlen har torkats bort (sk. green products) ska de värmebehandlas i en ugn för att få rätt mikrostruktur och tillstånd. Processen, som kallas bränningen består av de tre stegen [2]:

1. Förberedande reaktioner till sintringen, vilket innebär organisk utbränning (termolys) och eliminering av sönderdelade och oxiderade gasprodukter.
2. Sintringssteget, vilket är konsolideringsfasen.
3. Kylningen, vilken är såväl termisk som kemisk.

I det första steget skall alla restbindningstillsatser som används vid formningen avlägsnas. Utbränningen beror av blandningen och flödet av gas runt produkterna och i porerna.

Med sintringen menas att krympningen och packningen av materialet har skett. (I verkliga processer har inte alltid detta skett.) Den drivande kraften är sänkning av Gibbs energi, vilket innebär en strävan efter lägsta möjliga energitillstånd. I ett initialt skede av sintringen packas materialet långsamt. Därefter går densitetsökningen mycket snabbt, för att mot slutet avstanna helt.

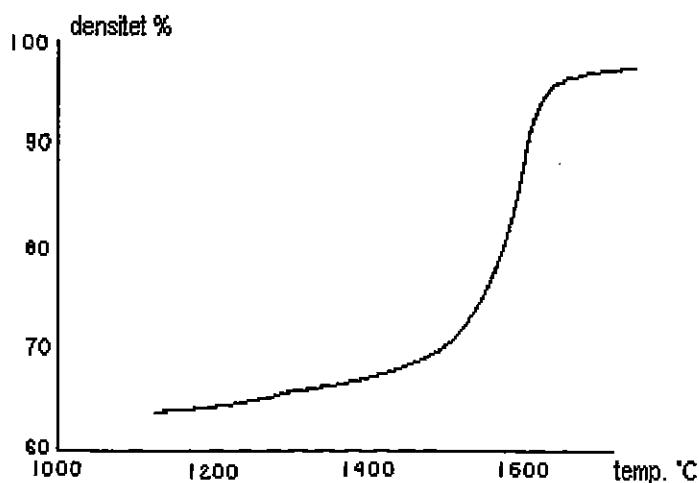


Fig. 2.2.1 Bränningen av ett Aluminiumpulverbaserat material. Sintringen är den branta delen av kurvan

Det finns ett mycket stort antal olika ugnstyper för sintring av keramiska produkter. Principiellt skiljer man på periodiska ugnar som laddas för varje bränning (tex Batchugnar) och ugnar som

kontinuerligt kan matas med gods (tex tunnelugnar). Den senare typen används för produkter som skall köras i stora serier utan att ändra ugnens inställning. Cykeltiden (se steg 1-3 ovan) för en sådan ugn kan vara flera dygn.

För de stora tunnelugnarna används idag mestadels gasol eller naturgas som bränsle. Elektriskt uppvärmning är vanligast i mindre ugnar. Förbrukningen av energi under bränningen är avsevärd och kan uppgå till flera ton gasol varje dag, vilket gör keramisk industri till stora energikonsumenter.

2.3 Mikrovågor

Elektriska svängningskretsar alstrar elektromagnetiska vågor med varierande elektriska och magnetiska fält. Den del av dessa svängningar som har frekvenser i området 0.3-30 GHz kallas mikrovågor [3]. Vanligaste frekvensen för industriella tillämpningar är 2.45 GHz. Vågorna behöver inget speciellt medium för sin utbredning och kan tränga igenom gas, vätskor och fasta ämnen.

Ämnen som dämpar mikrovågor heter dielektrikum och de omvandlar energin som är lagrad i vågorna till värme. Dielektrikum består av ett antal partiklar som inte är elektriskt neutrala, vilket leder till att ämnet lätt kan polariseras. När ett fält läggs över dessa kommer de positiva laddningarna att orientera sig mot den negativa fältsidan och de negativa mot den positiva sidan. Dipolerna kommer att vrida sig på liknande vis. När det elektriska fältets polaritet växlas kommer laddningarna och dipolerna att byta riktning. Mikrovågorna kommer att ge upphov till storleksordningen 10^9 svängningar (byten av riktningar) varje sekund. Alla dessa rörelser gör att partiklarna och dipolerna krockar och gnids mot varandra. Materialet blir på så vis uppvärmt.

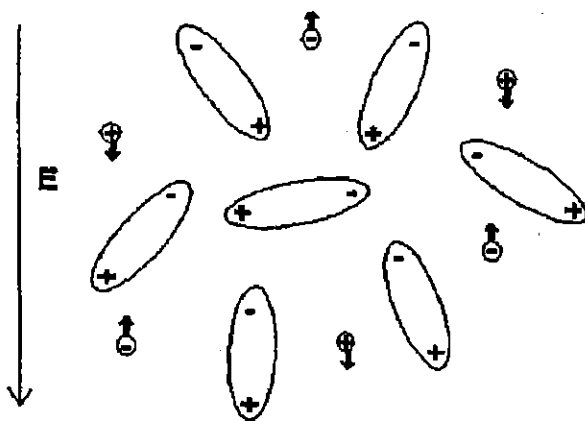


Fig. 2.3.1 Partiklar och dipoler i ett elektriskt fält

Värmningen av objektet är beroende av vågornas utbredning enligt den s.k. vågekvationen

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \epsilon_0 \mu_0 \epsilon^* \mu^* \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

, där ϵ är dielektricitetskonstanten och * indikererar komplex storhet, med lösningen [4]

$$E = E_{\max} e^{j2\pi ft - (\alpha + j\beta)z} = E_{\max} e^{-\alpha z} e^{j(2\pi ft - \beta z)}$$

, vilket är en periodisk våg med frekvensen f som rör sig i z -riktningen med den komplexa vågutbredningsfaktorn $p = \alpha + j\beta$.

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$$

, där ϵ' är den relativa dielektricitetsfaktorn och ϵ'' är förlustfaktorn.

Den relativa dielektricitetsfaktorn anger polariseringsförmågan, dvs hur mycket elektrisk energi ämnet kan lagra, och förlustfaktorn visar hur mycket av den lagrade energin som kan omsättas till värme.

Den stora fördelen med mikrovågsvärmning är möjligheten att momentant tillföra energi till de inre delarna av ett objekt.

2.4 Mikrovågor i keramer

Den effektiva förlustfaktorn för keramer består huvudsakligen av dipolära förluster och förluster på grund av jonledning, enligt [5].

$$\epsilon''_e = \epsilon' + \frac{\sigma}{f\epsilon_0}$$

I rumstemperatur är keramer i princip transparenta för mikrovågor medan förlustfaktorn stiger dramatiskt över en viss materialberoende kritisk temperatur (se fig. 2.4.1). Därför går mikrovågsvärmning av keramer relativt långsamt vid låga temperaturer medan hastigheten i uppvärmningen ökar vid högre temperaturer.

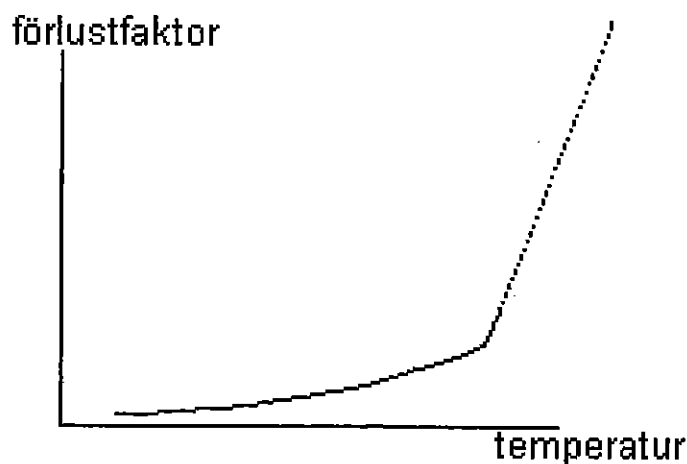


Fig 2.4.1 Typisk variation av förlustfaktorn med temperaturen för en "low loss" keram.

Under lång tid har man forskat på mikrovågssintring av keramer. Ett flertal material har varit föremål för olika typer av experiment. Även försök med att använda strålningsvärme i den lägre och mikrovågor i den högre temperaturzonen har gjorts [6].

Resultaten och slutsatserna av dessa försök har varierat beroende på vilket ämne som testats. Trots detta kan man klart se för- och nackdelar med att använda endast mikrovågor vid sintring [7]. Mikrovågssintring, som går snabbare än klassisk, minskar kornstorleken tack vare en lägre sintringstemperatur. Dessutom kan en noggrannare sintring ske. Tyvärr uppkommer oftast betydande temperaturgradienter mellan det uppvärmda materialet och ytterhöljet, vilket leder till sprickor och ojämnheter. Problemet är alltså till viss del det omvända mot konventionell värmning.

3 MICROWAVE ASSISTED GAS FIRING

3.1 Inledning

Den traditionellt använda tekniken, som tidigare beskrivits, med värmning utifrån och in går långsamt och är därför energikrävande. Dessutom har man svårt att få en jämn temperaturfördelning över hela godset. Variationer med 50-100 °C mellan de yttre delarna och kärnan vid sintringstemperaturen är inte ovanliga. Följden blir att man inte får ett homogent material och i sämsta fall sprickor. På grund av keramiska materials egenskaper (ledningen $<1\text{ W/mK}$) är problemet svårt att lösa med ändringar i den konventionella processen.

När mikrovågor når materialet bromsas de upp i det inre av dielektrikum och värmnet överförs till partiklarna i godset. Därefter sker värmeledningen konventionellt. Eftersom mikrovågorna tränger in i produkten skulle en jämnare fördelning av värmnet kunna ske. I teorin skulle man på detta sett kunna lösa problemet med ojämn värmnetillförsel.

I praktiken blir temperaturdifferensen vid ytan begränsningen. Till skillnad mot traditionell värmning har omgivningen vid mikrovågsvärmning en betydligt lägre temperatur än godset. Därför lämnar värme ytan, genom ledning och strålning, till omgivningen. Detta sker på grund av två mekanismer [8]:

1. Det bildas en temperaturgradient i godset då inte värme kan ledas tillräckligt fort till ytan från den uppvärmda delen (pga den dåliga ledningsförmågan).
2. Värmeförlusterna från godset till omgivningen ökar när temperaturgradienten blir större.

För att hindra dessa mekanismer har man provat att omsluta komponenterna med en termiskt riktig isolering som inte "släpper ut" värmnet. Man har även testat att använda material som reflekterar tillbaka mikrovågsenergin (sk susceptors) in genom ytan och på så sätt minska gradienten. Även kombinationer av de båda har provats.

De ovan nämnda teknikerna löser teoretiskt och i experiment problemet med gradienter. Vid användning av mikrovågsvärminng i industriell produktion blir det omständigt och dyrt. I praktiken är dessa åtgärder omöjliga vid större tillverkningsprocesser. Dessutom skulle det bli svårt att göra mätningar på och i godset.

Istället ligger nyckeln till en snabb och noggrann sintring i att kombinera fördelarna med strålningsvärme och volymetrisk mikrovågenergi. Att använda mikrovågorna för att värma upp godset inuti medan strålningen "skyddar" utifrån, så att värmendifferensen blir liten, är en möjlighet.

3.2 Forskning vid EA Technology, Storbritannien

EA Technology är ett utvecklingsföretag som tidigare ingick i de engelska elektricitetsbolagens organisation. Efter avregleringen och avmonopoliseringen av den brittiska elmarknaden har EA Technology blivit ett självständigt bolag. Personalen tillsammans med ett antal elektricitetsbolag utgör huvudägarna. Mot att tidigare bedrivit mest statsfinansierad forskning är idag många projekt finansierade av kommersiella intressenter.

Sedan mitten av 1980-talet har EA Technology arbetat med att utveckla tekniker för att sintra keramer med mikrovågor. Företaget har över 30 års erfarenhet av industriella mikrovågstillämpningar.

Microwave Assisted Gas Firing (MAGF)^[1] projektet har utvecklats efter en lång rad olika forskningsförsök inom såväl mikrovågssintring som andra sintringstekniker.

Från att från början drivit det som ett internt utvecklingsprojekt är MAGF idag ett konsortium av flera företag och organisationer från olika länder, lett av EA Technology. Projektet är mycket inriktat på att nå industriell användning inom kort.

3.3 Mikrovågsassisterad sintring

Alla inledande försök med att kombinera mikrovågsenergi med strålningsvärme gjordes i separata ugnar, där de olika uppvärmningsmetoderna skedde var för sig. Mikrovågsugnen blev på detta vis mycket komplicerad på grund av behovet av isolerande material, sk susceptorer. Utvecklingen av en kombinerande ugn var nödvändig.

Microwave Assisted Gas Firing är en hybridteknik som placerar strålningsenergi (gas eller elektricitet) och volumetrisk värme (mikrovågor) simultant i en ugn. De båda värmningsmekanismerna verkar samtidigt. I MAGF används mikrovågorna till att värma upp produkten medan strålningsenergin primärt används till förhindra att värme läcker ut från ytan. I MAGF finns inga isolerande material (susceptor etc) runt det värmda godset.

Då förlustfaktorn i keramer stiger med temperaturen kommer det att krävas ett mindre elektriskt fält, E-fält, vid högre temperaturer (konstant värmning). Därför kommer det elektriska fältet att variera enligt fig. 3.3.1. I MAGF tillåts förhållandet mellan mikrovågsenergin och strålningen variera. Därav kan temperaturberoende och temperaturoberoende storheter hållas separerade under processen [9].

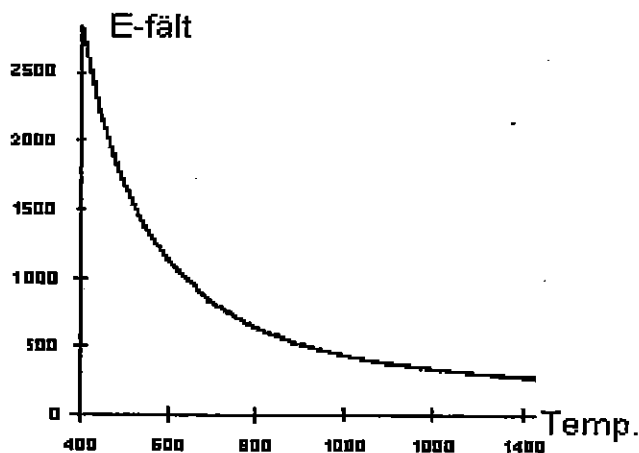


Fig. 3.3.1 Elektriska fältets variation med temperaturen i ett zirkoniummaterial vid mikrovågsassisterad sintring.

[1] Eftersom *Microwave Assisted Gas Firing* (MAGF) antyder att tekniken endast är tillämpbar med gasbränslen borde den logiska beteckningen i fortsättningen vara *Microwave Assisted Firing* (MAF), då strålningsvärmnet lika väl kan komma från el etc. I fortsättningen används dock MAGF då det är ett vedertaget uttryck.

3.4 Provanläggningen vid EA Technology

Under försöken har tre olika ugnar används, och en fjärde tas snart i drift. Den minsta är inte större än en vanlig hushållsmikrovågsugn medan den snart färdigställda tunnelugnen är 15 m lång. Alla ugnarna kombinerar simultant mikrovågor med strålningsvärme. I den minsta ugnen kommer strålningsvärmets från elektrisk resistens medan de övriga är gaseldade.

De tillämpade försöken som EA Technology utför åt konsortiemedlemmarna görs huvudsakligen i två ugnar (och snart i tunnelugnen). Den mindre, där enstaka gods körs, har en effektiv volym på ca 200 x 200 x 200 mm och den fullskaliga ugnen kan ta ca 1 m³ av testmaterialet.

Ugnarna har samma principiella uppbyggnad. Strålningsvärmets kommer från gaseldning medan mikrovågenergin tas från en vanlig mikrovågsgeneratorer. Kärnan i MAGF-tekniken är mät- och styrtekniken samt anpassningen till hur de olika energikällorna med- och motverkar varandra. EA Technology har därför flera egentillverkade delar i MAGF som klarar dessa krav. Bland annat har man en egenutvecklad dilatometer (som mäter krympningen/sintringen) som inte påverkas av eller påverkar mikrovågsvälvet. I testanläggningen har mycket stor hänsyn tagits till hur de olika mätgivarna påverkar mikrovågsutbredningen. För att skydda för externt läckage av mikrovågor har speciella chassimaterial och konstruktionstekniker används.



Fig.3.4.1 Den första fullskaliga (1 m³) pilotanläggningen.

De olika komponenterna i den fullskaliga pilotanläggningen (1m³) är var för sig inte speciellt unika. Ugnen är en vanligt förekommande *Batchugn*, modifierad för att mikrovågsledarna skall kunna anslutas. Den har sex gasbrännare som är placerade så att bästa möjliga cirkulation uppnås. Klystron och mikrovågsgenerator är även de av standardmodeller^[1], med varierbar

[1] Vid användning av mikrovågsgeneratorer kan nätåterverkan vara betydande. Det kan därför vara nödvändigt att installera ett filter mellan nät och generator, för att undvika störningar (distorsion mm).

effekt upp till 75 kW. Enheten som styr processen är specialdesignad för att passa simultan användning av mikrovågor och gasbränning. Med den styrs även effekt och temperaturstegringstakt.

Användningen av mikrovågor har gjort att man, med tanke på personsäkerhet och eventuellt läckage, måste bygga med speciella material i chassi, rökgaskanaler och utblås. Även tillflödena av mikrovågor till ugnen har tvingat fram unika lösningar för ventiler och munstycken. Stor hänsyn måste tas till läckage vid anslutningar, utblås och inte minst till miljön runt ugnen.^[1]

3.5 Experiment

EA Technology har tillsammans med deltagarna i konsortiet utfört experiment med ett flertal olika keramiska material. Man har bränt tegelstenar, takpannor, hushållsporlin, sanitetsgods och kakel. Därutöver har ett flertal olika industrikeramer och avancerade keramer prövats. I den minsta ugnen, som är elektrisk, har man även gjort tester med pulvermaterial, supraleddarmaterial och bränsleceller (SOFC).

Under försöken har ugnstemperaturen och temperaturen inuti i provet kunnat avläsas. Dilatometern har kontinuerligt angivit krympningen under sintringsförloppet. Effekten från mikrovågsgeneratoren - och hur mycket som reflekteras - och strålningseffekten har registrerats.

Mätresultaten har samlats upp och analyserats med hjälp av en dator, utrustad med en anpassad programvara. De har sedan används för att styra processen

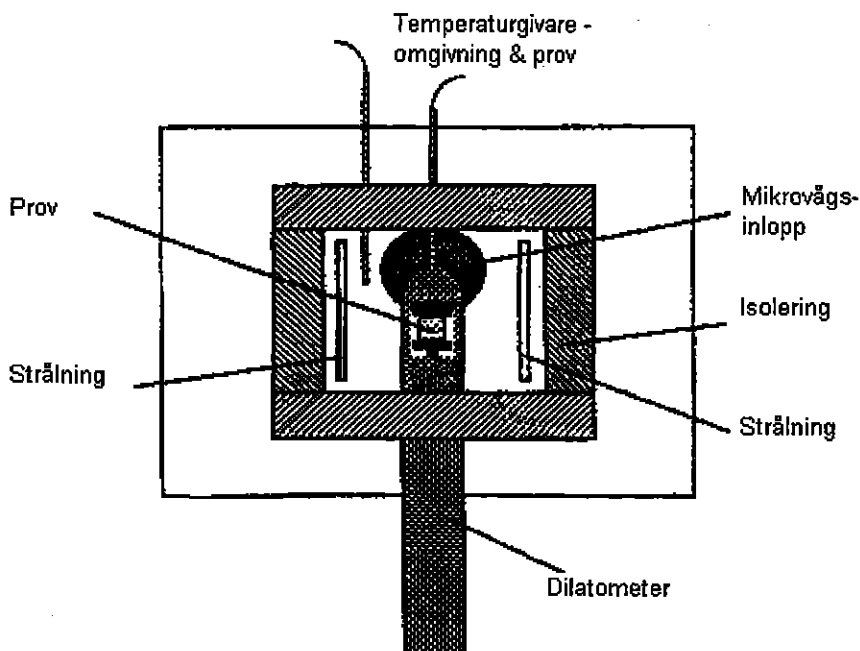


Fig. 3.4.3 Principiellt utförande på MAGF-ugn som används vid testläggningen.

[1] I Sverige föreskriver Arbetskyddstyrelsen i författningen AFS 1987:2 speciella regler för användning av högfrekventa elektromagnetiska fält. Maximala effektdoser etc. är angivna i författningen.

I den stora ugnen, med en kapacitet på ca 1000 kg (eller 1 m³), har man kunnat nå temperaturer upp till 1600 °C och i den mindre upp till 1650 °C. I Tunnelugnen kommer temperaturer runt 1600 °C att vara möjliga.

Resultaten och utvärderingen av experimenten i de olika ugnarna har i de flesta fallen varit helt förbehållna det deltagande företaget. I de flesta fallen har värmebehandlingen utförts hos EA Technology medan det färdiga provet sedan analyserats hos uppdragsgivaren. Konsekvensen av detta är att endast ett fåtal officiella resultat finns.

3.6 Resultat

3.6.1 Zirkoniumdioxid

I den mindre gaseldade ugnen har man med 1.2 kW mikrovågseffekt gjort experiment med stabiliserad zirkoniumdioxid, ZrO₂ (3mol% Y₂O₃). Man har gjort försök med såväl konventionell gaseldning, mikrovågssintring som MAGF. I de flesta experimenten har man höjt provets temperatur med 10 °C/minut upp till 1500 °C, där provet har hållits i en timme. Därefter har temperaturen sänkts med 20 °C/minut ner till rumstemperatur. Provet har varit storleksmässigt som en ärtä (~700mm³) för att inte få för stora temperaturvariationer (<2%).

När man jämför den linjära krympningen (längdminskningen, Δl dividerad med ursprungslängden, l_0) visar det sig att MAGF-kurvan är förskjuten med ca 80 °C jämfört med kurvan för konventionell sintring. Vidare är den totala krympningen, och tätheten i slutet större för MAGF-provet.

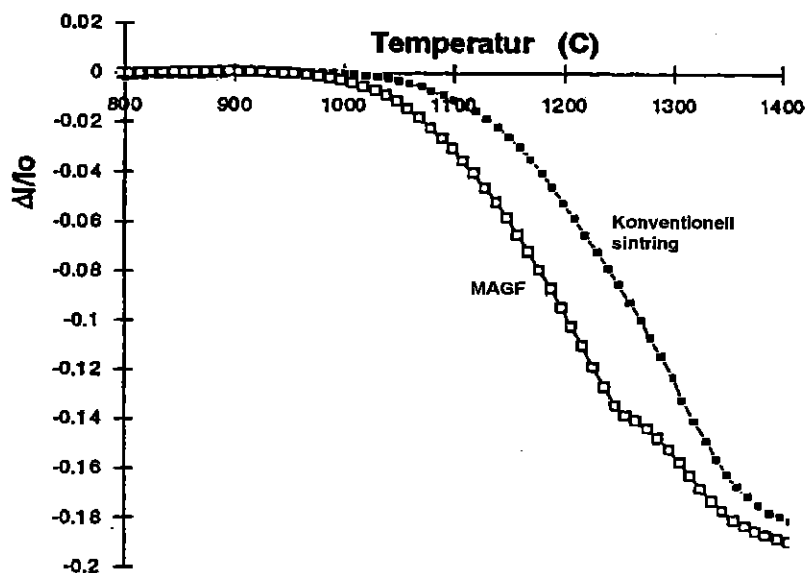


Fig. 3.6.1 Linjära krympningen för zirkoniumdioxid som funktion av temperaturen.

Om man istället tittar på krympningshastigheten, $d(-\Delta l/l_0)/dt$ visar det sig att MAGF når ett maxima vid ca 1200 °C och ett lokalt maxima vid ca 1300 °C. Vid den senare temperaturen når den konventionella sintringen sitt maxima.

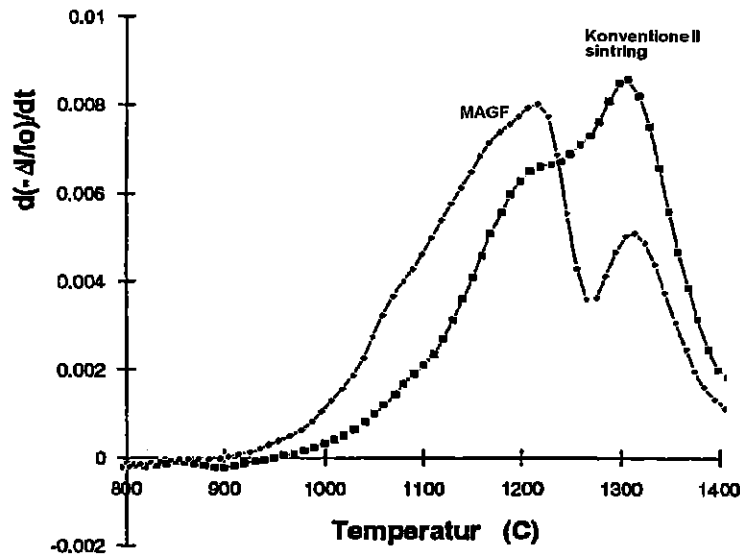


Fig. 3.6.2 Krympningshastigheten för zirkoniumdioxid som funktion av temperaturen.

Anmärkningsvärt är att det uppkommer två maxima vid mikrovågsassisterad sintring, där det senare lokala maximumet ligger nära det för den konventionella sintringen. Detta har visats vid tidigare experiment gjorda hos såväl EA Technology som av andra institutioner.

Om man istället väljer att variera mikrovågseffekten, och därmed det elektriska fältet, för att se hur det påverkar krympningshastigheten blir resultatet än tydligare. Ökande mikrovågseffekt leder till snabbare sintring.

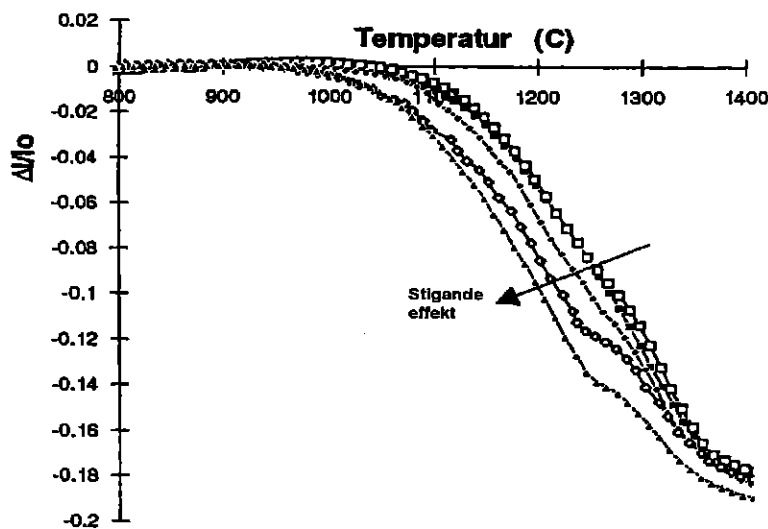


Fig. 3.6.3 Den linjära krympningen för zirkoniumdioxid som funktion av temperaturen vid olika mikrovågseffekter.

En annan mycket intressant jämförelse, är den mellan *Microwave Assisted Gas Firing* och långsam konventionell sintring. När man sänker den konventionella uppvärmningen till 1 °C/min och behåller MAGF på 10 °C/min blir förloppen mycket lika.

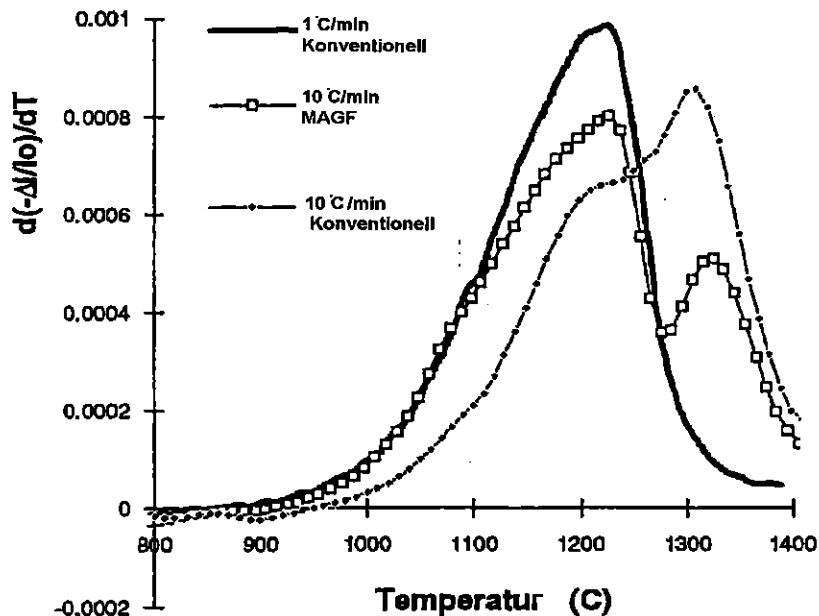


Fig 3.6.4 Linjära krympningshastigheten för zirkoniumdioxid vid olika temperaturstegringshastigheter.

Innebörden av detta är, vid bibehållande av det elektriska fältet under hela förloppet, att MAGF nästan exakt följer den konventionella kurvan. Med den viktiga skillnaden, att temperaturhöjningshastigheten skiljer sig med en faktor tio mellan de båda fallen. Dvs. man kan nå samma resultat tio gånger snabbare med MAGF.

För att visa skillnaderna i sintring mellan den mikrovågsassisterade tekniken och den konventionella har man efter en viss tid slagit av mikrovågsgeneratoren.

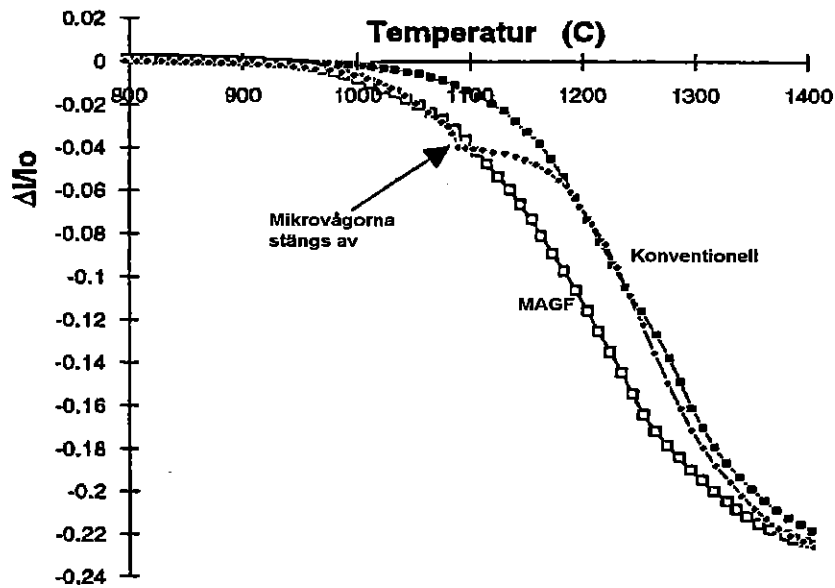


Fig. 3.6.5 Linjär krympning för zirkoniumdioxid som funktion av temperaturen. Dessutom visas konsekvensen av att stänga av mikrovågsgeneratoren vid ca 1080 °C.

Här visas klart att krympningen stannar av tills den når temperaturen för den konventionella kurvan. En viktig iakttagelse är också att kurvan når en större krympning än den konventionella. Dvs tätheten hos provet som inledningsvis assisterats med mikrovågor är större.

Diagrammen ovan (3.6.1-3.6.5) visar för stabiliserad zirkoniumdioxid att:

1. För en given krympningsgrad behövs 80-100 °C lägre temperatur för MAGF jämfört med konventionell sintring.
2. Sintringen (och ökningen i täthet) blir större med MAGF än med konventionell teknik.
3. Krympningshastigheten ökar markant med mikrovågsassisterad sintring.

3.6.2 Allmänt

Experimenten med zirkoniumdioxid är några av de få publicerade resultaten med *Microwave Assisted Gas Firing*. Därutöver har EA Technology presenterat ett flertal allmänna resultat från sin pilotanläggning [10]. Resultaten anges utan att exakt redogöra för hur försöken har utförts och vilket material som testats.

Med hjälp av dessa experiment hävdar man att vid användning av *Microwave Assisted Gas Firing* kan följande fastställas:

- Sintringstiden reduceras som lägst med en faktor fyra.
- Energikostnaden reduceras med minst 50%.^[i]

[i] Läsaren bör vara uppmärksam på att denna siffra anger förhållandena i England, där energipriserna på el etc skiljer sig från exempelvis Sverige.

- Såväl förbättrad kvalitet som mekaniska egenskaper har påvisats.
- Reduceringen av bindemedlen under sintringen har förbättrats.
- Kassationsgraden minskar.

Vid klassisk strålningssintring får man ofta en temperaturdifferens mellan inner- och ytterhöljet som är av betydande storlek. Med denna följer att det blir ojämn sintring och eventuell sprickbildning i materialet. Eftersom de termiska spänningarna i godset är direkt beroende av temperaturgradienten kan detta bara motverkas med minskad temperaturskillnad genom materialet.

Om man med en givare i det inre, och en på ytan, av ett prov mäter temperaturskillnaden kan man se hur stora spänningarna riskerar att bli. Vid mätningar vid olika temperaturer fick man en tydlig skillnad mellan MAGF och den konventionella tekniken. Den senare har en maximal temperaturdifferens på ca 80 °C mellan ytan och kärnan.

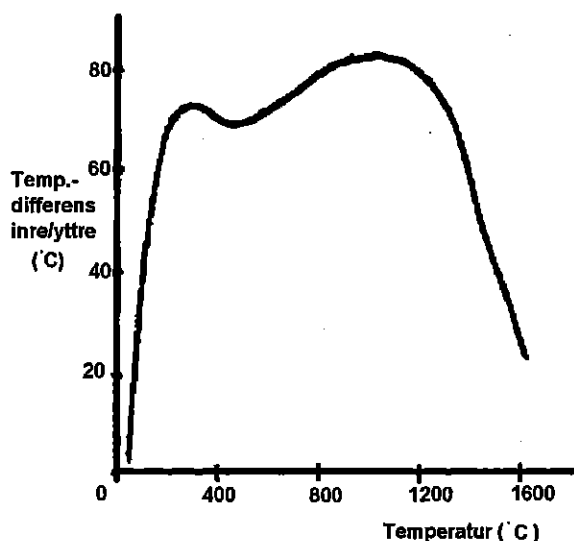


Fig. 3.6.6 *Temperaturens variation mellan det yttre och inre av provet vid konventionell sintring.*

När man gjorde samma mätning för *Microwave Assisted Gas Firing* kunde bara mycket små variationer upptäckas (vid 300-600 °C). Den maximala temperaturdifferensen var mindre än 10 °C.

När man tittade på hur kornstorleken varierade mellan ytan och det inre vid de olika sintringsteknikerna bekräftade det de tidigare resultaten. Med MAGF blev storleken mycket jämn medan den med konventionell teknik varierade nästan linjärt mellan yta och centrum.

Försök har också gjorts i den större ugnen, där man har registrerat temperaturskillnaden mellan de inre och yttre komponenterna i en hel sats. Dvs. hur olika sintringsförloppet blir för samma produkt beroende var i satsen den lastas. Jämförelsen är gjord mellan konventionell sintring och MAGF.

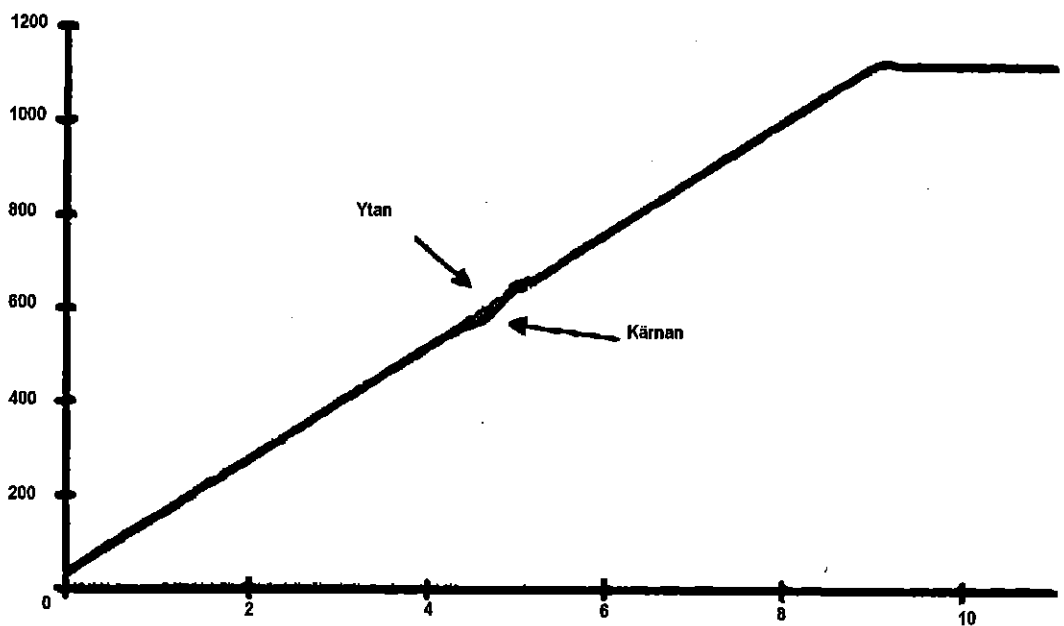
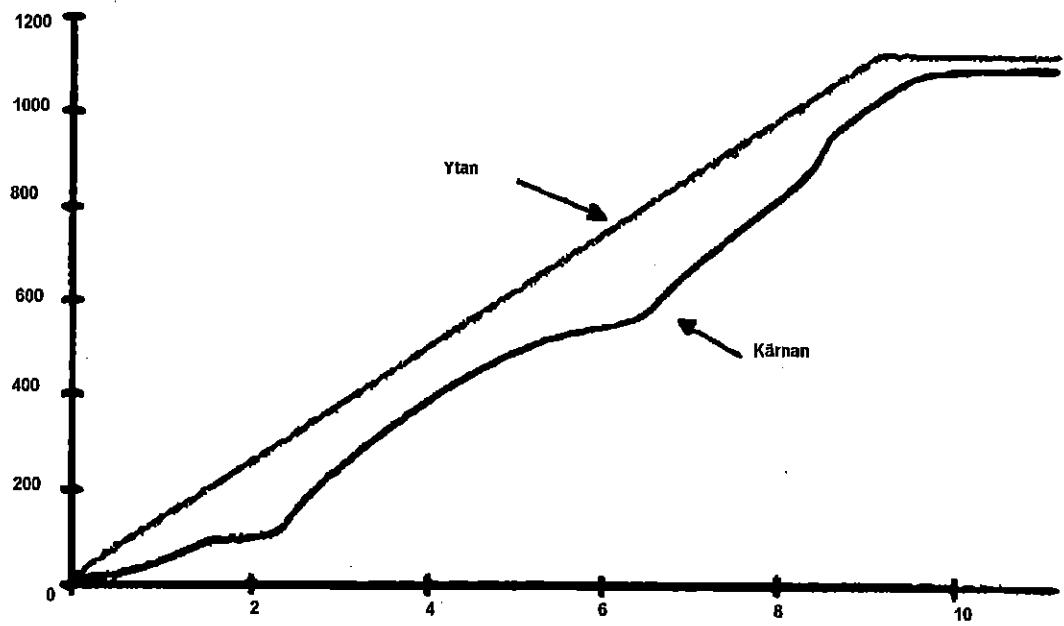


Fig. 3.6.7 Uppmätta temperaturer vid en last av komponenter - på ytan och i kärnan - med konventionell sintring (övre figuren) och MAGF (nedre figuren). Temperaturen ($^{\circ}\text{C}$) på lodräta och tiden (h) på den vågräta axeln.

Vid det övre förloppet finns det mycket stor risk för att olika delar av lasten får olika prestanda. Med MAGF uppnås en jämn sintring för hela lasten.

Tack vare *Microwave Assisted Gas Firing* har man kunnat påvisa minskade miljöfarliga utsläpp. Huvudsakligen beroende på en kortare sintringstid. Bland annat reduceras fluoremissionerna med ca. 25%. Detta på grund av att tiden, då temperaturen är över 850 °C blir betydligt kortare.

3.7 Konsortiet, bildat för MAGF-försök vid EA Technology

Microwave Assisted Gas Firing-projektet drivs som ett konsortium, där externa intressenter finansierar och initierar experimenten. Idag är 30-40^[1] utrustningstillverkare, keramikföretag och elektricitetsbolag medlemmar i konsortiet, knappt 30 är slutanvändare i keramikindustrin. Deltagarna kommer från Storbritannien, Tyskland, USA och Österrike. Den samlade insatsen i konsortiet uppgår hittills till drygt 20 miljoner SEK (£1.9 miljoner).

Medlemmarna får utföra sex veckors försök i de tre olika ugnarna. Dessa tester är uppdelade i tre olika steg:

- Första steget är en veckas försök i den mindre ugnen, som kan inledas relativt snart efter deltagandet bestämts.
- Steg 2 och 3 utförs vid en senare tidpunkt.

Det första steget kostar ca. £8000 och totalt kostar alla tre stegen ca. £45000. Avgiften varierar dock beroende på när man går med. Efter varje steg har deltagaren rätt att lämna konsortiet.

Resultaten från de enskilda försöken är förbehållna deltagaren och behandlas konfidentiellt. Medlemmarna kan även utvärdera proven själva. Alla medlemmar har dessutom rätt till generella rapporter efter varje steg.

Alla som deltar i konsortiet (dvs alla tre stegen) får en *Royalty free licence*, för att kostnadsfritt kunna använda MAGF-tekniken. Övriga användare av MAGF kommer efter konsortiets slut, 1998, tvingas att betala en avgift för utnyttjande av MAGF-tekniken. (>£100.000).

I slutet av april-96 kommer den 15m långa tunnelugnen att levereras till EA Technology. Därefter skall den installeras och startas upp. För att därefter kunna användas för försök.

Det är fortfarande möjligt för nya intressenter att delta i konsortiet.

[1] Deltagarantalet stiger hela tiden. Exakt vilka företag som är medlemmar är inte officiellt. Den enskilda medlemmen avgör själv om deltagandet skall vara konfidentiellt eller inte.

4 DEN SVENSKA MARKNADEN

4.1 Inledning

I Sverige finns det ett 20/30-tal företag som skulle kunna vara intresserade av olika tillämpningar med *Microwave Assisted Gas Firing*. Dessa finns uteslutande i slutanvändarledet inom keramik- och materialindustrin. Deras intresse, och eventuella nytta med MAGF, kan delas upp i två skilda grupper. De företag som huvudsakligen konkurrerar om:

1. Pris
2. Kvalitet

Naturligtvis är alltid båda faktorerna viktiga men de flesta företag hör tydligt till en av de två kategorierna.

Till den första gruppen hör den traditionella kermiska industrin. De flesta av dessa företag masstillverkar standardvaror, som exempelvis sanitetsporcelain, tegel eller takpannor. För dessa företag är en pris ett avgörande konkurrensmedel.

Till den senare gruppen hör några få, men framgångsrika, "hightech"-företag. Deras produkter är ofta unika med avseende på material och tillämpning. Lönsamheten avgörs till största del av hur unika produkter man kan få fram. Det kan exempelvis handla om att tillverka ett korrosions- eller slittåligt material.

4.2 Traditionell keramisk industri

Den massproducerande industrin har under de senaste decennierna genomgått stora omstruktureringar och rationaliseringar för att kunna konkurrera med andra tillverkare. Flera industrier har fått läggas ner medan andra kraftigt reducerat sin produktion. De flesta har fått ändrade ägarförhållande. Under början av 1990-talet har dessutom flera av företagen befunnit sig i en djup konjunktursvacka, på grund av byggkrisen. Ett typiskt företag har [11]:

- Stora delar av sin försäljning till Sverige och Norden. Deras kunder finns ofta i byggsektorn.
- Energi och kassationer som påverkbara kostnader. (Arbetskraften är ofta den största enskilda kostnadsposten. Den är dock oftast minimerad, dvs det är en person som sköter ugnen.)
- Standardprodukter som tillverkas i stora serier.
- En eller flera stora tunnelugnar som går kontinuerligt.
- Gasol eller naturgas som bränsle och en förbrukning av flera ton bränsle per dag.
- Låg investeringstakt.

Värdet av en övergång till *Microwave Assisted Gas Firing* ligger uteslutande i möjligheten till energibesparingar och en ökning av produktionshastigheten. Det är svårt att se sådana produktförbättringar som dramatiskt kan minska kassationsgraden, då dessa oftast har sitt ursprung i förformningen.

För de 20-talet företag inom den traditionella keramikindustrin, som skulle kunna ha nytta av MAGF, är framtida tester vid den 15 meter långa tunnelugnen vid EA Technology nödvändiga före ett eventuellt investeringsbeslut kan tas.

4.3 Materialforskningsindustrin

Till den här gruppen av företag hör ett antal forskningsintensiva verkstadsföretag, vars produkter kräver unika material. Med hjälp av ett bättre material kan prestandan på maskinen, verktyget eller komponenten höjas, vilket leder till konkurrensfördelar.

Vid bränningen använder man i de flesta fall specialtillverkade ugnar som anpassats till företagets tillverkning. Det är vanligt att processen är trycksatt, utnyttjar speciell förbränningsteknik eller att ugnen har en unik geometri. De här ugnarna är alltså mindre standardbetonade än de som finns inom den traditionella keramiska industrin.

Eftersom dessa företags processer huvudsakligen syftar till att framställa så unika produkter som möjligt så blir behovet av *Microwave Assisted Gas Firing* väldigt svåröverblickbart. Bristen på information om såväl de nuvarande processerna, i dessa företag, som prestandaförbättringarna med MAGF betyder att inga slutsatser om efterfrågan kan dras. Däremot kan man finna den största potentialen, förutsatt prestandaförbättringar, för MAGF inom den här gruppen av företag. En till synes mycket liten förbättring av produkten kan för dessa forskningsintensiva företag vara tillräckligt för att pröva MAGF: Resurserna för att göra investeringar är enormt mycket större inom denna industri än den traditionella industrin.

4.4 MAGF-utvecklingen i Sverige

Det är mycket osannolikt att de massproducerande keramiska företagen kan börja investera i MAGF-tekniken före entydiga och fullskaliga försök har visat klara förtjänster. De ekonomiska ramarna för dessa företag är alldeles för snäva för att köpa oprövad teknik. Däremot kan flera av företagen, enskilt eller tillsammans, vara intresserade av att delta i konsortiet.

Bland materialforskningsföretagen kommer teknikutvecklingen följas noggrant. Det företag som kan se någon nytta med MAGF kommer snabbt att närma sig konsortiet och/eller själva göra olika tester. Här är de ekonomiska ramarna betydligt vidare.

5 SLUTSATSER

EA Technology har kommit mycket långt i sitt arbete med att utveckla en ny sintringsteknik. *Microwave Assisted Gas Firing* projektet kommer att avslutas 1998. Då skall konsortiet vara klar med utvärderingen av tekniken och licenser börja säljas. Hur detta kommer att lyckas avgörs av ett flertal faktorer.

Idag finns bara detaljerade resultat från tester utförda med stabiliserad zirkoniumdioxid och ett antal allmänna resultat som EA Technology presenterat, utan att offentligt redovisa detaljerna. Alla de övriga resultaten har förbehållits de i konsortiet deltagande företagen. Hur bred och detaljerad den informationen är, är omöjligt att överblicka.

Eftersom zirkoniummaterial är mycket unika, och ej likvärdiga med andra keramiska material, måste resultaten från dessa försök tolkas med stor noggrannhet. Dessa resultat kan bara vara vägledande för hur den mikrovågsassisterade sintringen förändrar processförloppet jämfört med konventionell sintring. Endast företag som tillverkar olika typer av avancerade konstruktions- och funktionskeramer kan ha direkt användning av testerna med zirkoniummaterial. Eventuellt skulle de presenterade resultaten med zirkoniumdioxid kunna betraktas som "bevis" på att EA Technology kunnat nå fram till sina allmänt redovisade resultat.

De allmänna resultaten vidgar avsevärt användningsområdet för MAGF. Även om man inte får reda på alla detaljerna bakom siffrorna är de mycket klagörande. Utifrån dessa kan man dra ett antal slutsatser.

- Med MAGF kommer sintringen av keramer att kunna göras betydligt snabbare än idag. Med en ökning av genomloppstiden med minst en faktor fyra kan de flesta industrier minska ner antalet ugnar avsevärt. För de företag som har ugnen som en "trång sektor" kan förbättringen bli än mer avgörande.
- Spänningar i materialet, på grund av temperaturgradienter, kommer att minska med MAGF. Dessutom förbättras jämnheten i temperatur i stora ugnar. Där är avståndet mellan yttre och inre komponenter avsevärt. Detta kommer att leda till jämnare sintring och minska kassationstalen. Det är dock viktigt att komma ihåg att de flesta kassationer beror på förförmningen och att de blir uppenbara först i och med bränningen.
- Exakt hur stora förbättringar av prestanda som är möjliga med MAGF är omöjligt att generellt bedöma. Användningsområdet är troligen avgörande för hur stora framgångarna blir för tekniken. En förbättring av materialprestanda kan vara värd oerhört mycket för tillverkare av industriella keramer. Deras betalningvilja för en sådan förbättring kommer att ha mycket stor inverkan på MAGF-projektet.
- Energikostnaderna kommer kraftigt att reduceras med MAGF. Hur mycket, beror på bränsleprisernas relativa utveckling. Det är här viktigt att inte betrakta bränningen skild från den övriga processen. Även om EA Technology anger en energikostnadsbesparing för bränningen på 50% betyder inte det att en lika stor total besparing är möjlig. De flesta industrier använder spillvärme till torkningssteget etc och kan därför inte se bränningssteget separat. Därför bör energibesparingsuppgiften ses i ett helhetsperspektiv.

- En annan mycket viktig konsekvens av ändringen av energikälla är miljöpåverkan. Om man byter ut en del av gasen/oljan mot el kan utsläppen minskas. Dessutom innebär en minskning i energianvändning alltid en minskning i utsläpp. Förutom den bevisade minskningen av fluoremissioner kommer de flesta utsläppen från förbränningen (NO_x , SO_x , CO_x) att reduceras.

För den traditionella keramiska industrin är energibesparingsmöjligheten och den minskade genomloppstiden mycket viktiga, och bör noggrant följas. Det är mer tveksamt huruvida kassationstalen kommer att vara betydelsefulla. Prestandaförbättringarna är avgörande för den forskningsintensiva keramikindustrin.

Eftersom det hittills har varit omöjligt att göra fallstudier, med MAGF, måste man vara mycket försiktig med att dra långtgående slutsatser för hur den egna produktionen kan förbättras. Det är viktigt att resultaten från den 15 meter långa tunnelugnen blir kända för att några slutsatser skall kunna dras. Det kan inte uteslutas att tekniken bara fungerar i mindre ugnar.

Det går inte heller att några slutsatser huruvida *Microwave Assisted Gas Firing* är en lönsam teknik. Detta beror på att väldigt få kostnader för att modifiera en befintlig eller bygga en ny ugn är kända. Här blir den första kommersiella ugnen ett viktigt riktmärke. En del av de deltagande utrustningstillverkarna i konsortiet kommer säkerligen inom en snar framtid redovisa mer intressanta kostnadsberäkningar för den nya tekniken.

En sammanfattande slutsats är att *Microwave Assisted Gas Firing* kan innebära en betydande förbättring av bränningen i keramikindustrin. Utvecklingen måste därför följas och påverkas av svenska keramikintressenter.

6 FORTSATT ARBETE

Förutom att följa utvecklingen för konsortiet *Microwave Assisted Gas Firing* är det ett antal studier som bör göras innan man kan ha en mer definitiv åsikt om projektet.

Det är nödvändigt att fördjupa sig i hur olika material påverkas av mikrovågor och strålningens energi. Den här rapporten ger ej tillräcklig information om hur de bakomliggande mekanismerna inverkar på de olika stegen i processen.

Den viktigaste uppgiften är dock att få fram mer tillämpbar information. Med detta menas information som är relevant för en specifik användning. Om man skall kunna utvärdera huruvida en investering i MAGF är lönsam måste man ha tillgång till data och resultat som kan överföras utan fel. Idag finns ingen sådan information. Åtminstone inte allmänt publicerad.

För de industrier som använder tunnelugnar är därför igångsättandet av den 15 meter långa pilotugnen nödvändig. Att följa upp resultaten av försöken i den kan dessutom ge en bättre bild av hur uppskalning av MAGF fungerar.

Det kommer troligen under de närmaste åren komma fler fullskaliga MAGF-ugnar som används kommersiellt. Det är mycket viktigt att följa upp resultaten i dessa.

7 REFERENSER

- [1] *Keramguiden, 2:a utgåvan, 1989*. Redigerad av Elis Carlström, Svenska Keraminstitutet.
- [2] *Principles of ceramics processing, 2nd edition, 1995, sid 583*. James S. Reed, John Wiley & Sons Inc.
- [3] *Mikrovågsenergi som energikälla i kemiska reaktioner: Teori och tillämpningar, Förstudie utförd för Sydkraft AB, 1994*. Fredrik Brogaard, Kemisk Teknologi, Lunds Tekniska Högskola.
- [4] *Industriell mikrovågsvärmning - ny teknik med stora möjligheter, Kista 23-24 mars 1994, Avsnitt Industriell mikrovågsvärmning*. Konferensmaterial från Industriellt Mikroelektroniskt Centrum AB, Stockholm.
- [5] *Microwave Sintering of Advanced Ceramics, sid 39-40*. British Ceramics Proceedings, 1993. Edited by D.P. Thomson.
- [6] *Microwave (Hybrid) Heating of Alumina at 2.45 Ghz: 1. Microstructural uniformity and homogeneity*. Arindam Dé, ..., Dept. of Materials Science and Engineering, University of Florida, Gainesville, USA.
- [7] *Ceramic Transactions, vol. 21, Microwaves: Theory and Application in materials processing, kapitel Microwave Sintering (alla conclusion)*. Edited by David E Clark, ..., The American Ceramic Society Inc.
- [8] *Microwave-assisted Firing of Ceramics, särtryck. ur Ceramic Technology International - July '95*. Ruth Wroe, EA Technology, UK.
- [9] *Evidence for a Non-Thermal Microwave Effect in the Sintering of Partially Stabilised Zirkonia.*, Särtryck för publicering i *Journal of Material Science*, 1996. Ruth Wroe och Andrew T. Rowley, EA Technology, UK.
- [10] *Telefonsamtal och Telefax från EA Technology*. Mike Bond, Allastair Davies och Allison Bettley, UK.
- [11] *Telefonintervjuer med företrädare för keramisk industri i Sverige*. Ett 20-tal nyckelpersoner har intervjuats under 1995/96.