

## MIKROFALOWE UTWARDZANIE RDZENI Z ODLEWNI „URSUS” W LUBLINIE

Miroslaw PIGIEL\*, Ryszard PAROSA\*\*, Edward RESZKE\*\*  
Piotr GRZEŚKOWIAK\*\*

\* Zakład Odlewnictwa i Automatykacji ITMiA Politechniki Wrocławskiej  
\*\* „Plazmatronika – Service S.A.”, Wrocław

### 1. WPROWADZENIE

Utwardzanie rdzeni odlewniczych z piasku kwarcowego i żywic jest jednym z istotnych etapów w procesie produkcji odlewów. Technologia „hot box” jest bardzo energochłonna. Alternatywną metodą może być proces utwardzania rdzeni z wykorzystaniem energii mikrofalowej. W pracy niniejszej przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, mających na celu określenie warunków technicznych dla prowadzenia tego procesu oraz oceniono jakość rdzeni utwardzonych z wykorzystaniem mikrofal.

Do utwardzania rdzenia odlewniczego z piasku kwarcowego i żywic termoutwardzalnych w mikrofalach wytypowano jeden z rdzeni wykonywanych metodą gorącej rdzennicy w odlewni URSUS w Lublinie. Komorę mikrofalową wykonano w postaci prostopadłościanu umożliwiającej wzbudzenie kilku rodzajów pola (modów). Rdzennica wykonana została z teflonu z dodatkiem  $Al_2O_3$ . Warunkiem szybkiego utwardzania rdzenia w całym jego przekroju było umieszczenie go w silnym i równomiernie rozłożonym polu mikrofalowym [1].

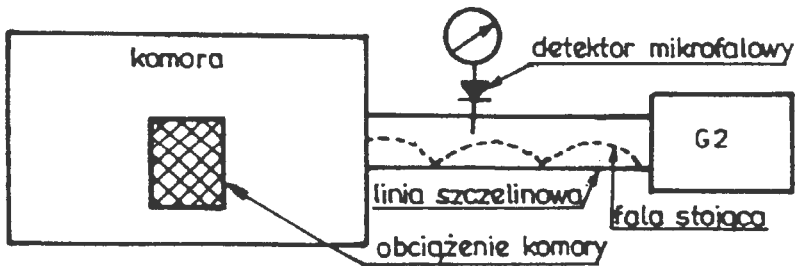
### 2. PROJEKT KOMORY MIKROFALOWEJ [4] [5]

Komorę mikrofalową o wymiarach 310x300x250 mm. zasilono z czterech stron za pośrednictwem falowodów co umożliwiło wzbudzenie co najmniej 6 rodzajów pola (modów) przy założeniu, że pasmo mikrofal generowane przez zastosowane magnetrony wynosi  $2450 \text{ MHz} \pm 25 \text{ MHz}$ .

Wymiary komory:  $a_x = 0,31$ ;  $b_y = 0,3$ ;  $a_z = 0,25$  [m]  
Dla  $f(\text{rez})$  od 2,425 GHz do 2,475 GHz

Komora pusta dla  $m, n, p$  od 0 do 5  
Mody: (510)  $f(\text{rez}) = 2,462 \text{ GHz}$   
(430)  $f(\text{rez}) = 2,447 \text{ GHz}$   
(340)  $f(\text{rez}) = 2,441 \text{ GHz}$   
(104)  $f(\text{rez}) = 2,440 \text{ GHz}$   
(014)  $f(\text{rez}) = 2,443 \text{ GHz}$

W komorze wypełnionej materiałem dielektrycznym (forma + utwardzony materiał) wzbudzone mogą być inne rodzaje pola (mody). Ich szczegółowa analiza teoretyczna, wymaga rozwiązania równań falowych dla wyidealizowanej komory. W celu określenia jedynie ilości i rodzaju kolejnych modów wzbudzanych w częściowo wypełnionej komorze wystarczy jednak przyjęcie „efektywnej” przenikalności dielektrycznej wypełnienia komory. Obliczenia wykonano dla  $\epsilon_{sk} = 2$  oraz  $\epsilon_{sk} = 3$ . Wyniki obliczeń pokazały, że przy  $\epsilon_{sk} = 2$  w komorze może być wzbudzone co najmniej 12 rodzajów pola (modów), natomiast przy  $\epsilon_{sk} = 3$  może być wzbudzonych aż 23 rodzaje pola. Energia mikrofalowa z generatorów wprowadzana była do komory za pośrednictwem falowodów prostokątnych rodzaju  $TE_{01}$ . Falowody zamontowano na czterech ścianach, wzajemnie prostopadłe. Pozwoliło to wyeliminować zjawisko bezpośredniego sprzęgnięcia się generatorów i umożliwiło pobudzenie modów o składowych pola elektrycznego o wszystkich możliwych polaryzacjach. Kompensacji fali odbitej dokonano za pomocą przesłon indukcyjnych w falowodzie prostokątnym łączącym generator z komorą. W celu zaprojektowania przesłon indukcyjnych wykonano pomiary współczynnika fali stojącej (wfs) we wszystkich czterech liniach zasilających. Pomiar współczynnika fali stojącej oparty jest na pomiarze rozkładu amplitudy natężenia pola elektrycznego  $|E|$  za pomocą sondy elektrycznej sprzężonej z detektorem mikrofalowym V, przesuwanym wzdłuż linii falowodowej (rys. 1).



Rys. 1. Pomiar dopasowania komory do generatora mikrofalowego.

Fig.1 Measurements of microwave matching of the cavity to microwave generator

Wartość współczynnika fali stojącej (wfs) wyznacza się z zależności

$$wfs = U_{max} | U_{min} \quad (1)$$

gdzie:  $U_{max}$  – wartość maksymalna natężenia pola w linii,

$U_{min}$  – wartość minimalna natężenia pola w linii.

Wartości  $U_{max}$  i  $U_{min}$  wyznacza się poprzez pomiar prądu detektora mikrofalowego połączonego z ruchomą sondą, z uwzględnieniem krzywej kalibracji detektora. W trakcie pomiarów komora mikrofalowa była „obciążona” pojemnikiem z wodą. Pomiary (tabela 1) wykazały, że w trzech liniach zasilających nie była konieczna kompensacja fali odbitej, bowiem moc odbita nie przekraczała 10% mocy mikrofalowej transformo-

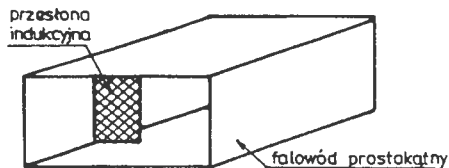
wanej z generatora. W przypadku generatora G2 (rys. 3) zmierzony współczynnik fali stojącej (wfs) przekraczał wartość 15 co oznacza, że aż 76,6% mocy z generatora odbijane było w płaszczyźnie komory. Po kompensacji odbicia współczynnik fali stojącej (wfs) zredukowano do około 2,14, co oznacza, że tylko 13% mocy z generatora odbijane było w płaszczyźnie komory.

Tabela 1: Wyniki pomiarów współczynnika fali stojącej

Table 1. Results of measurements of standing wave ratio.

Nr generatora	$U_{max}$ [V]	$U_{min}$ [V]	Wfs	Uwagi
G1	2,680	1,550	1,32	
G2	2,150	0,470	2,14	z przesłoną
G3	2,598	2,180	1,19	
G4	2,354	2,180	1,08	

Na rysunku 2 pokazano sposób wykonania przesłony dopasowującej w falowodzie łączącym generator G2 z komorą.



Rys. 2. Sposób umieszczenia przesłony w falowodzie łączącym generator z komorą.

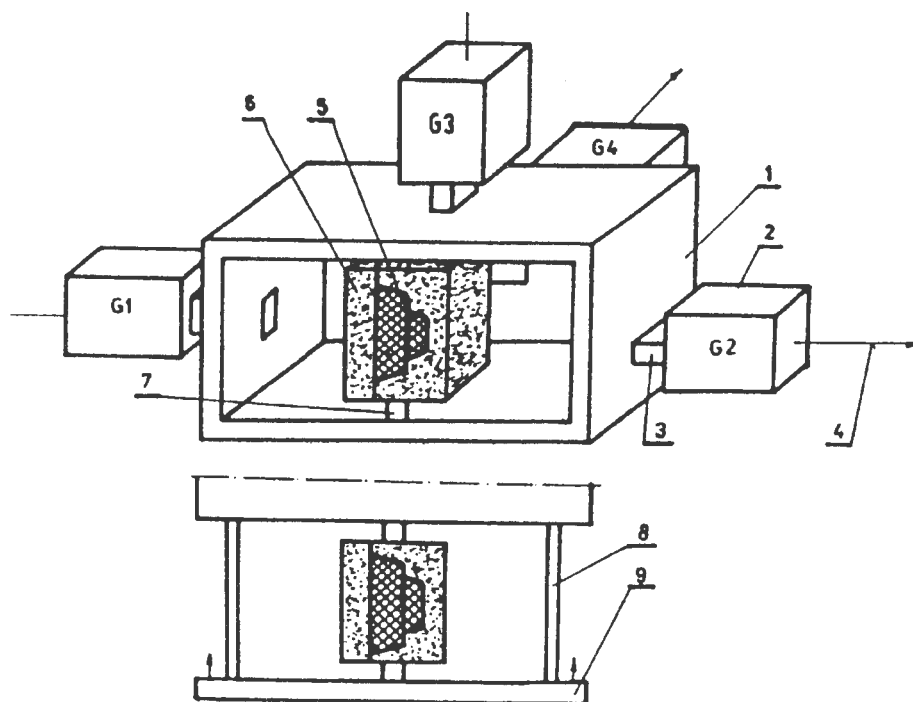
Fig.2 The means of placement of the matching diaphragm in the waveguide connecting the cavity with microwave generator

## 2. BADANIA WŁASNE

### 2.1. Stanowisko badawcze [5]

Na rysunku 3 pokazano opracowane i zbudowane, przy współpracy z firmą „Plazmatronika Service.” we Wrocławiu stanowisko do badania mikrofalowego utwardzania rdzeni z piasku kwarcowego i żywic termoutwardzalnych.

Komora mikrofalowa 1 wykonana została w postaci prostopadłościanu o wymiarach 310x300x230 mm, do którego czterech ścian, przy pomocy falowodów prostokątnych 3 w standardzie R32 przymocowane cztery generatory 2. Na przewodnicach 7 ustawiano rdzennicę dielektryczną, wykonaną z teflonu o wymiarach 205x170x100 mm z rdzeniem 5 (o objętości około 500 cm<sup>3</sup>) we wnętrzu. Po otwarciu drzwi 9 komory mikrofalowej na specjalnych przewodnicach umieszczana jest dielektryczna rdzennica i następnie wsuwana do wnętrza komory przy zamykaniu drzwi. Otwarcie drzwi 9 komory mikrofalowej i odsunięcie ich na przewodnicach 8 wysuwa rdzennicę na zewnątrz. Zdejmując z przewodnic 8 rdzennicę, można je otworzyć i wyjąć utwardzony rdzeń 5. Generatory G3 i G4 zasilane są z zasilaczy o stałej mocy wyjściowej P = 700 W. Generatory G1 i G2 zasilane są z zasilaczy o płynnej regulacji mocy od 0 do 700 W. Konstrukcja „dławikowa” drzwi zapobiega promieniowaniu mikrofal na zewnątrz urządzenia.



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego: 1 – komora mikrofalowa; 2 – generatory (G1–G4); 3 – falowody; 4 – przewody do zasilaczy mikrofalowych; 5 – utwardzany rdzeń; 6 – rdzennica dielektryczna; 7 – prowadnice rdzennicy; 8 – prowadnice drzwi komory; 9 – drzwi komory

Fig. 3. Schematics of the experimental stand: 1 – Microwave cavity, 2 – The generators G1–G4, 3 – waveguides, 4 – supply cables for microwave generators, 5 – a core to be hardened, 6 – dielectric core box, 7 – guide bar of the core box, 8 – slide bearing of the cavity door, 9 – cavity door

### 3.2. Materiały użyte do badań i sposób ich przygotowania

Badania przeprowadzono dla trzech rodzajów mas formierskich o składach podanych w tabeli 2.

Masy sporządzano w mieszarce laboratoryjnej typu LM1 produkcji WADAP w Wadowicach. Odważoną ilość piasku i utwardzacz mieszano przez 2 minuty, następnie dodawano żywicę i mieszano przez dalsze 2 minuty. Tak przygotowane masy przechowywano w szczelnie zamkniętym worku foliowym. Żywotność mas wynosiła ok. 60 minut. Producentem żywic i utwardzaczy jest firma PPMOBIL Lumar S.C. w Milejowiu.

cach koło Radomia. Skład mas jak i sposób ich przygotowania był zgodny z zaleceniami producenta. Do przeprowadzania badań mikrofalowego utwardzania rdzeni odlewniczych wytypowano rdzeń seryjnie wykonywany w Odlewni Żeliwa URSUS w Lublinie. Jego kształt i wymiary przedstawiono na rysunku 4.

Tabela 2. Wyniki pomiarów utwardzania rdzenia. Skład mas  
Table 2. Results of hardening tests. Composition of sandmix.

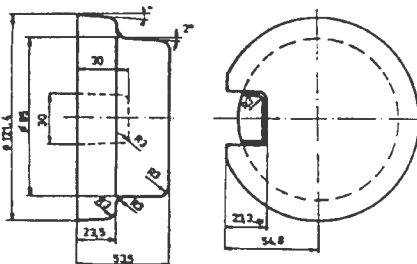
l.p.	Moc [W]		Czas [min]	Temperatura rdzenia [°C]						Temperatura formy [°C]					Skład masy	Uwagi
	stała	zmienna		punkt pomiaru temperatury						punkt pomiaru temperatury						
				1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5		
1	2x600	2x600	2,5	129,6	124,6	148,1	130,2	136,5	139,5	128,8	116,6	127,8	111,3	115,1	piasek - 3000g	dobry rdzeń
2	2x600	2x600	2,0	120,8	119,4	128,4	126,3	117,1	112,3	124,1	105,3	114,5	110,4	100,2	żywica MM-304	---
3	2x600	2x600	1,5	109,6	114,1	116,6	128,6	10,7	107,8	117,4	103,6	105,5	103,6	92,0	- 90g	---
4	2x600	2x600	1,0	101,7	95,9	113,1	92,4	98,3	102,4	99,3	95,8	102,7	86,4	87,1	utwardzacz AKI.	---
5	2x600	2x600	0,5	69,4	75,4	76,6	61,3	65,8	-	82,7	74,3	76,9	78,8	69,6	- 6,75g	miękki rdzeń
6	2x600	2x600	2,5	150,0	141,7	151,0	152,6	150,1	142,0	107,9	110,5	115,8	117,2	97,4	piasek - 3000 g	dobry rdzeń
7	2x600	2x600	2,0	146,3	140,4	154,2	130,8	154,2	149,6	125,1	114,8	127,1	113,3	111,3	żywica MM-690	---
8	2x600	2x600	1,5	129,7	126,6	143,1	118,7	134,6	134,6	100,7	97,6	107,7	99,9	94,5	- 90g	---
9	2x600	2x600	1,0	126,6	128,1	128,3	115,5	135,3	130,6	109,1	113,1	119,3	105,6	107,8	utwardzacz N-27	miękki rdzeń
10	2x600	2x600	2,5	124,4	123,2	138,3	119,8	136,8	134,1	107,8	118,7	120,1	108,9	110,7	piasek - 3000 g	dobry rdzeń
11	2x600	2x600	2,0	119,4	114,9	132,0	111,5	126,7	123,5	104,7	108,1	116,9	103,2	100,7	żywica MM-690	---
12	2x600	2x600	1,5	112,6	110,1	122,6	103,2	120,7	115,3	198,1	103,4	103,3	98,6	92,3	- 90 g	---
13	2x600	2x600	1,0	109,0	99,1	114,3	89,6	109,9	103,3	95,1	90,4	94,6	87,7	84,6	utwardzacz AKI.	---
14	2x600	2x600	0,5	82,8	79,1	88,4	65,3	82,6	82,6	81,5	78,9	81,4	92,2	76,0	- 6,75 g	miękki rdzeń

### 3.3. Badania procesu utwardzania

Badania procesu utwardzania rdzeni w dielektrycznej komorze mikrofalowej obejmowały pomiary temperatury w wybranych punktach rdzenia i w wybranych punktach rdzennicy oraz ocenę stanu jakościowego utwardzonego rdzenia.

Na rysunku 5 pokazano punkty pomiaru temperatury na rdzeniu i w formie.

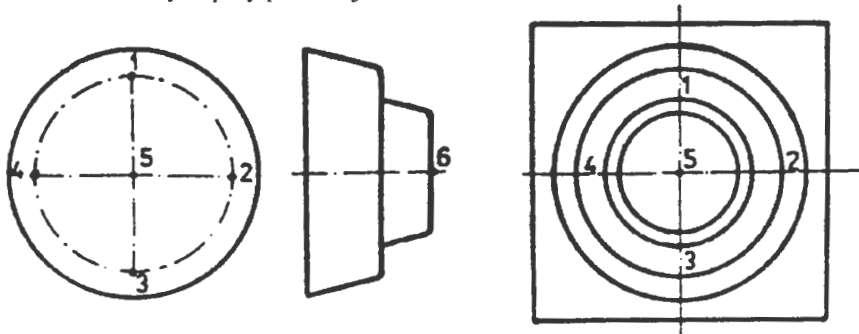
Pomiary temperatury rdzenia i formy wykonywane były bezkontaktowo, za pomocą miernika temperatury firmy RAYTEK typ ST (system infra-red – pomiar promieniowania podczerwonego). Wyniki pomiarów temperatury rdzenia i formy przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 4. Kształt i wymiary rdzenia

Fig 4. The shape and dimensions of the core

Przy pełnej mocy wszystkich czterech generatorów ( $P = 2400 \text{ W}$ ) czas utwardzania wynosił od 0,5 do 2,5 min. Po przecięciu kilku rdzeni na dwie równe połowy stwierdzono, iż są one utwardzone w całym przekroju poprzecznym praktycznie niezależnie od czasu ich utwardzania w polu mikrofalowym. Stwierdzono też, że utwardzanie rdzenia w czasie 1 minuty przy pełnej mocy pozwala na otrzymanie rdzenia utwardzonego w całym swoim przekroju poprzecznym. Dwadzieścia sztuk rdzeni z żywicą MM-304 (skład w tabeli nr 2) przekazano Odlewni Żeliwa URSUS w Lublinie, gdzie użyto je w formach odlewniczych przy produkcji odlewów.



Rys. 5. Punkty pomiaru temperatury na: a) rdzeniu; b) formie.

Fig. 5. Positioning of temperature sensors a) in the core b) in the core box

### 3. PODSUMOWANIE

Bazując na wynikach uprzednio przeprowadzonych badań można stwierdzić, iż w mikrofalach można utwardzać rdzenie i formy, w skład których wchodzi różnego rodzaju żywice termoutwardzalne [2]. Przeprowadzono badania utwardzania rdzenia o przekroju prostokątnym ( $35 \times 35 \times 80 \text{ mm}$ ) z przewężeniem ( $4 \text{ mm}$ ) w rdzennicy dielektrycznej teflonowej z 25% dodatkiem proszku alundowego [3].

Opracowana i wykonana rdzennica mikrofalowa umożliwia w sposób powtarzalny utwardzać wybrany rdzeń w czasie 1 minuty, przy zasilaniu mocą mikrofalową około  $2400 \text{ W}$ . Jakość utwardzonych rdzeni jest bardzo dobra. Uwzględniając sprawność generatorów mikrofal (magnetronów) wynoszącą ok. 60%, należy ocenić całkowite zapotrzebowanie mocy na poziomie  $3700\text{--}4000 \text{ W}$ . Na utwardzenie jednego rdzenia zużywano więc od  $0,061 \text{ kWh}$  do  $0,066 \text{ kWh}$ . Koszt energii niezbędnej do utwardzenia rdzenia nie przekraczał zatem  $1,8$  grosza. Utwardzając taki sam rdzeń konwencjonalnie, koszty utwardzania są wielokrotnie wyższe. Niskie nakłady energetyczne przy nagrzewaniu mikrofalowym wynikają z faktu transmisji energii bezpośrednio do rdzenia. W metodach utwardzania konwencjonalnego temperatura metalowej rdzennicy wynosi ok.  $260\text{--}280^\circ\text{C}$ , zaś przy utwardzaniu mikrofalowym temperatura ta nie przekracza w praktyce  $120\text{--}130^\circ\text{C}$ .

Badania jakości powierzchni i struktury odlewów wykonanych z użyciem rdzeni utwardzanych w mikrofalach przeprowadzało laboratorium metalurgiczne Odlewni

Żeliwa URSUS w Lublinie. Jakość grafitu w odlewach z rdzeniami utwardzanymi w mikrofalach jest taka sama jak w odlewach z rdzeniami utwardzonymi konwencjonalnie.

W pełni uzasadnionym wydaje się więc opracowanie i wdrożenie systemów nagrzewania mikrofalowego zamiast konwencjonalnego w urządzeniach do wykonywania rdzeni z żywic termoutwardzalnych.

## 5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski.

1. Rdzenie z piasku kwarcowego i żywic termoutwardzalnych mogą być utwardzane w rdzennicy dielektrycznej w mikrofalach.
2. Komorę mikrofalową należy zasilać z kilku generatorów, co zapewni jednorodny rozkład pola elektromagnetycznego w jej wnętrzu.
3. Dla każdego kształtu i wielkości rdzenia oraz rodzaju żywicy należy doświadczalnie ustalić parametry pracy (moc, czas nagrzewania).
4. Jakość rdzeni utwardzonych w mikrofalach nie odbiega od jakości rdzeni utwardzonych konwencjonalnie.
5. Utwardzanie rdzeni w mikrofalach wielokrotnie obniża zużycie energii oraz o dwukrotnie obniża temperaturę utwardzania w stosunku do metod konwencjonalnych.

## LITERATURA

1. Litwin R., Suski M., Technika mikrofalowa, Warszawa 1972.
2. Pigiel M., Utwardzanie rdzeni w mikrofalach, Acta Metallurgica Slovaca, 4, Nr specj. 2/1998, s. 102-106.
3. Pigiel M., Utwardzanie mikrofalami rdzeni z piasku kwarcowego i żywic termoutwardzalnych, Acta Metallurgica Slovaca 5, 2/1999, s. 43-48.
4. Thomas M.E., Techniki i urządzenia mikrofalowe, Poradnik, WNT, Warszawa 1978.
5. Pigiel M., Samsonowicz Z., Parosa R., Opracowanie mikrofalowego utwardzania rdzeni z piasku kwarcowego i żywic termoutwardzalnych, Raport ITMiA PWr., serii SPR nr 15/99, praca na prawach rękopisu wykonana na zlec. KBN, projekt badawczy Nr 7 T08B 02712, Wrocław 1999.

Recenzował: prof. dr hab. inż. Zdzisław Samsonowicz