

Michał Mikoś, Tadeusz Koseski

Instytut Techniki Ciepłej

## ANALIZA STOPNIA WYKORZYSTANIA PROSZKU W PROCESIE NATRYSKIWIANIA PLAZMOWEGO

W pracy opisano model obliczeń matematycznych, które umożliwiają wyznaczenie stopnia wykorzystania materiałów powłokowych wprowadzonych do plazmotronu w postaci sproszkowanej, w procesie natryskiwania ich na podłoże o dowolnym kształcie. Obliczenia oparto na bilansie masy podawanego proszku, przy czym uwzględniono współczynnik odbicia uzależniając jego wartość zarówno od konstrukcji plazmotronu, jak i od właściwości proszku.

### WYKAZ OZNACZEŃ

- $D$  – średnica natryskiwanego wałka [m]  
 $d$  – średnica strugi w miejscu natryskiwania [m]  
 $l$  – długość powierzchni natryskiwanej [m]  
 $n$  – normalną do powierzchni natryskiwanej  
 $M$  – ogólnie masa proszku [kg],  $M_{p1}$  – wysypanego do podajnika,  $M_{p2}$  – pozostałego w podajnik po natryskiwaniu,  $M_{p3}$  – niewyparowanego.  
 $m$  – strumień masowy proszku ( $m = M/\tau$ ) [kg/s],  $m_c$  – całkowity (doprowadzony do plazmotronu),  $m_d$  – dopływający do miejsca natryskiwania,  $m_n$  – tracony w związku z nawrotem posuwu,  $m_{od}$  – odbity od powierzchni,  $m_{op}$  – opływający powierzchnię natryskiwaną,  $m_p$  – prostopadły do powierzchni,  $m_s$  – styczny do powierzchni,  $m_t$  – tworzący powłokę,  $m_w$  – wyparowany.  
 $S_1$  – przekrój strugi w miejscu natryskiwania [m<sup>2</sup>]  
 $S_2$  – powierzchnia przedmiotu natryskiwanego [m<sup>2</sup>]  
 $S_2'$  – rzut powierzchni przedmiotu natryskiwanego ( $S_2$ ) na przekrój strugi w miejscu natryskiwania ( $S_1$ ) [m<sup>2</sup>]  
 $f(\alpha)$  – funkcja opisująca związek między  $m_d$  i  $m_p$   
 $\alpha$  – kąt między normalną do powierzchni a osią strugi plazmy [°]  
 $\phi$  – stopień wykorzystania materiału w % ( $(m_d/m_c) \cdot 100\%$ )

$\tau$  – czas natryskiwania [s]

$\mu$  – masa przedmiotu na którym znajduje się powierzchnia natryskiwana [kg],  $\mu_1$  – przed natryskiwaniem,  $\mu_2$  – po natryskiwaniu.

$\Psi$  – bezwymiarowy współczynnik odbicia w % ( $(m_t/m_p) \cdot 100\%$ )

## WSTĘP

W pracy dokonano analizy stopnia wykorzystania materiału, w postaci proszku z ziaren o granulacji rzędu 40  $\mu\text{m}$ , przy natryskiwaniu plazmowym powłok. Stopień ten określono jako stosunek masy powłoki do masy doprowadzonego proszku do plazmotronu. Jest to wielkość bezwymiarowa, wyrażana w procentach.

Stopień wykorzystania proszku jest ważnym parametrem procesu, a jego znajomość jest niezbędna w projektowaniu operacji technologicznych. Natomiast metoda prowadząca do jego określenia polega na zestawieniu bilansu materiałowego i określeniu poszczególnych jego składników. Uwzględniając ustalony charakter procesu natryskiwania sprowadza się to do określenia rozplywu strumienia proszku całkowitego, doprowadzonego do plazmotronu.

Celem pracy było opracowanie modelu obliczeniowego stopnia wykorzystania proszku dla wytworzenia powłoki na powierzchni natryskiwanej o dowolnym kształcie. Uzyskanie takiego modelu wymagało przeprowadzenia eksperymentalnych badań, a także testów, przedstawionych w pracy w Dodatkach: 1, 2, 3. Model został zweryfikowany badaniami eksperymentalnymi przy natryskiwaniu powłok na różne powierzchnie walcowe i płaskie.

## 1. BILANS MASOWY PROSZKU

Zestawienie bilansu masowego proszku w postaci strumieni masowych rozplywu, przedstawionego schematycznie na rys. 1, wymaga omówienia poszczególnych strumieni oraz założeń wynikających z uwarunkowań fizycznych, prowadzących do ich wyznaczenia i podania zależności opisujących te strumienie.

a. Strumień całkowity, doprowadzony do plazmotronu ( $m_c$ ), wyznaczano wagowo określając masę proszku wsypanego do podajnika ( $M_{p1}$ ) oraz masę proszku pozostałego w podajniku po skończeniu natryskiwania ( $M_{p2}$ ) oraz pomiaru czasu natryskiwania ( $\tau$ ). Uwzględniając ustalony charakter natryskiwania i stałość strumienia w czasie jest on równy:

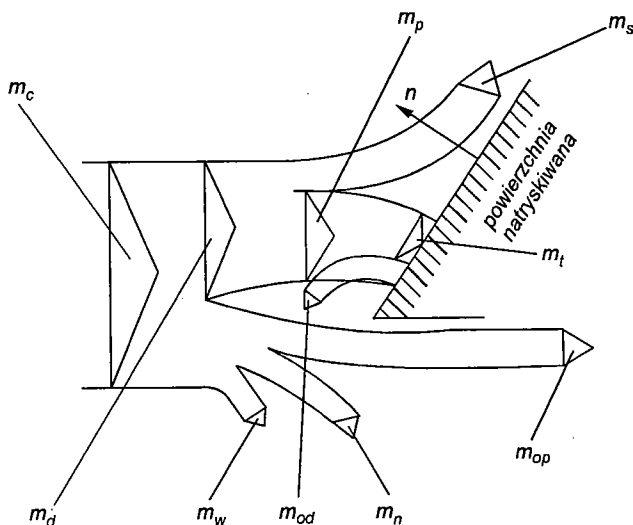
$$m_c = (M_{p1} - M_{p2})/\tau. \quad (1)$$

b. Strumień wyparowany, na który składa się zarówno proszek ulegający wyparowaniu jak i ewentualnie rozkładowi chemicznemu na związki gazowe ( $m_w$ ), wyznaczano wagowo określając masę proszku niewyparowanego ( $M_{p3}$ ) oraz czas natryskiwania ( $\tau$ ) w sposób opisany w Dodatku 2. Jest on równy:

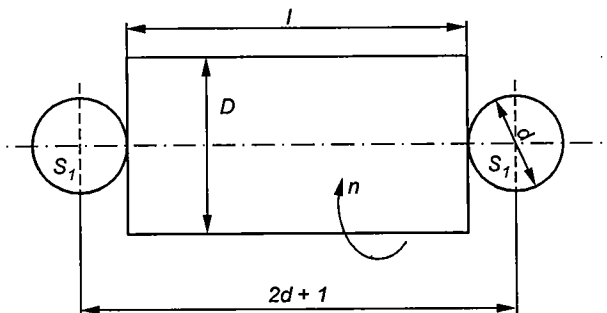
$$m_w = m_c - (M_{p3}/\tau). \quad (2)$$

c. Strumień tracony w związku z nawrotem posuwu ( $m_n$ ) jest niezbędny do uzyskania powłoki o jednakowej grubości na całej długości natryskiwania. Dla przedmiotu o długości  $l$  rys. 2 należy przemieścić strugę poza obrys długości o całą średnicę strugi. Wartość strumienia traconego dla zadanej geometrii, określono z prostego związku, wynikającego bezpośrednio z rys. 2:

$$m_n = [2d/(l + 2d)] \cdot (m_c - m_w). \quad (3)$$



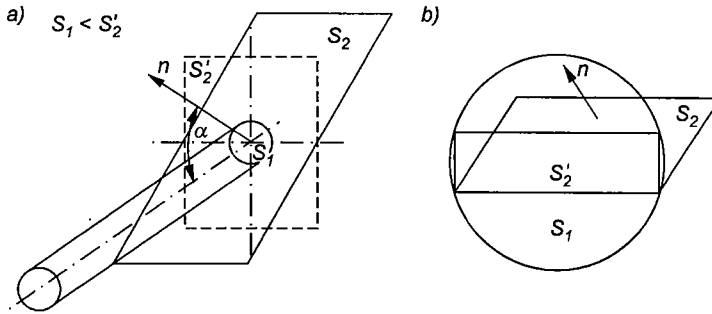
Rys. 1. Wykres pasmowy rozplywu ziaren



Rys. 2. Rysunek wyjaśniający strumień tracony w związku z nawrotem posuwu przy natryskiwaniu wałka o średnicy  $D$  i długości  $l$ ; przekrój strugi  $S_1$  w skrajnych jej położeniach wychodzi poza obrys przedmiotu o długości  $l$

d. Strumień opływający powierzchnię natryskiwaną ( $m_{op}$ ), występuje wówczas gdy rzut powierzchni natryskiwanej na powierzchnię prostopadłą do kierunku strugi w miejscu natryskiwania jest mniejszy od przekroju strugi. Strumień ten łatwo określić ze stosunku rzutu powierzchni przedmiotu natryskiwanego na przekrój strugi w miejscu natryskiwania ( $S_2'$ ) oraz przekroju strugi w miejscu natryskiwania ( $S_1$ ), co ilustruje rys. 3, a więc:

$$m_{op} = [(S_1 - S_2')/S_1] \cdot (m_c - m_w - m_n). \quad (4)$$



Rys. 3. Rysunek do wyjaśnienia strumienia opływającego powierzchnię natryskiwaną: a)  $S_1 < S_2'$ ,  $n$  - normalna do powierzchni  $S_2$ ,  $S_2'$  - rzut płaszczyzny  $S_2$  na płaszczyznę prostopadłą do kierunku strugi,  $S_1$  - rzut strugi na powierzchnię  $S_2'$ ,  $m_{op} = 0$ ; b)  $S_1 > S_2'$ , oznaczenia jak na rys. a

$$m_{op} = m_c \cdot (S_1 - S_2')/S_1$$

e. Strumień dopływający do powierzchni natryskiwania ( $m_d$ ) określono z różnicy między strumieniem całkowitym, a strumieniami: wyparowanym, traconym w związku z nawrotem posuwu oraz opływającym powierzchnię natryskiwaną:

$$m_d = m_c - m_w - m_n - m_{op}. \quad (5)$$

f. Strumień prostopadły do powierzchni ( $m_p$ ), określono poprzez analizę wpływu kąta nachylenia powierzchni natryskiwanej ( $\alpha$ ) na stopień wykorzystania proszku. Szczegóły tej analizy przedstawiono w Dodatku 3. Strumień ten jest równy:

$$m_p = m_d \cdot f(\alpha). \quad (6)$$

g. Strumień styczny do powierzchni ( $m_s$ ), określono jako różnicę między strumieniem dopływającym do powierzchni, a prostopadłym do powierzchni (określonym w p. f i Dodatku 3):

$$m_s = m_d - m_p. \quad (7)$$

- h. Strumień tworzący powłokę ( $m_t$ ), wyznaczano wagowo. Określano masę przedmiotu, na którym znajduje się powierzchnia, przed natryskiwaniem ( $\mu_1$ ) i po natryskiwaniu ( $\mu_2$ ) w ustalonym procesie. Jest on równy:

$$m_t = (\mu_2 - \mu_1)/\tau. \quad (8)$$

- j. Strumień odbity od powierzchni ( $m_{od}$ ), wyznaczono eksperymentalnie. Jest to różnica między strumieniem prostopadłym do powierzchni, a tworzącym powłokę na powierzchni prostopadłej do osi strugi; przy czym przekrój strugi nie wychodzi poza obrys powierzchni przedmiotu ( $m_{op} = 0$ ,  $m_n = 0$ ,  $m_w = 0$ ). Sposób przeprowadzenia eksperymentu omówiono w Dodatku 1:

$$m_{od} = m_p - m_t. \quad (9)$$

Łatwo zauważyć z powyższego omówienia, że uwarunkowania: c, d, f, g zależą od relacji geometrycznych strugi i natryskiwanej powierzchni. Natomiast ostatnie uwarunkowanie (j) zależy w znacznym stopniu od jakości plazmotronu. W badaniach użyto plazmotronu MIM-40, w którym występuje dobre uporządkowanie przepływu magneto hydrodynamicznego i nadanie ziarnom proszku korzystnych trajektorii. Zabezpiecza to dobre przetopienie ziaren i nadanie im dużych prędkości. Jest to ściśle związane ze strumieniem odbitym, bo ziarna źle przetopione i o małej prędkości w małym stopniu uczestniczą w utworzeniu powłoki i część ich odbija się od powierzchni natryskiwanej. Dlatego strumień odbity od powierzchni, wyznaczony zgodnie z eksperymentem omówionym w Dodatku 1, może stanowić test jakości plazmotronu.

Uwzględniając powyższe uwarunkowania, można zestawić bilans masowy proszku w postaci algebraicznej, nawiązującej do wykresu pasmowego z rys. 1:

$$m_c = m_w + m_n + m_{op} + m_s + m_{od} + m_t. \quad (10)$$

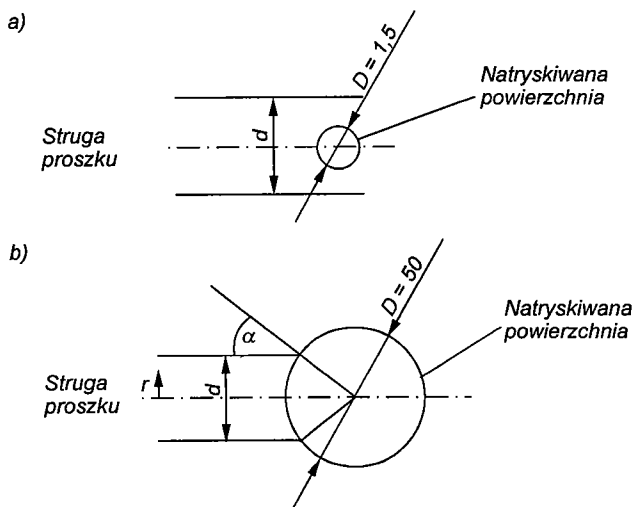
Stopień wykorzystania proszku określa stosunek strumienia tworzącego powłokę do strumienia całkowitego:

$$\phi = (m_t/m_c) \cdot 100\%. \quad (11)$$

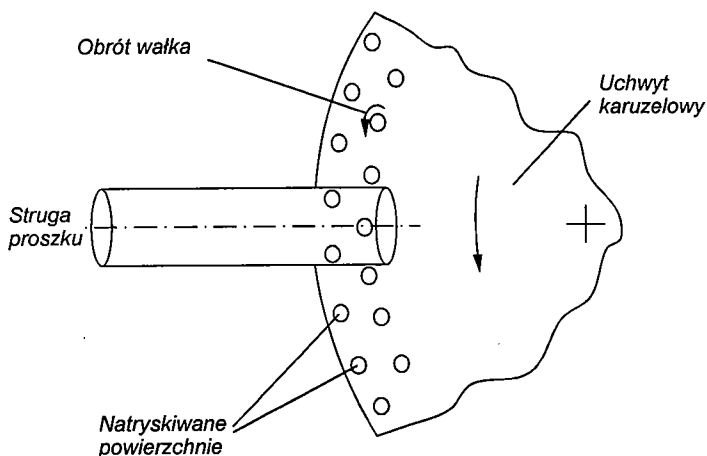
## 2. PORÓWNANIE WYNIKÓW ZAPROPONOWANEGO OPISU WYKORZYSTANIA PROSZKU Z DANymi EKSPERYMENTALNYMI

Zaproponowany opis wykorzystania proszku, może być użyty dla dość dowolnej powierzchni natryskiwanej, jednak weryfikację ograniczono do kilku przy-

padków. Trzy z nich stanowią bardzo typową dla natryskiwania plazmowego powierzchnie walcowe (o średnicach 1,5 mm, 20 mm, 50 mm rys. 4). Czwarty stanowi dość złożoną powierzchnię, uzyskiwaną w wyniku przemieszczania się w uchwycie karuzelowym 98 igieł o średnicy 1,5 mm, umieszczonych w dwóch rzędach. Konfigurację powierzchni natryskiwanej ze strugą przedstawia rys. 5, przy czym każda z igieł obraca się dookoła własnej osi z prędkością, która zapewnia jeden jej obrót w czasie przechodzenia przez strugę.



Rys. 4. Użyte powierzchnie walcowe do weryfikacji zaproponowanego modelu obliczeniowego:  
a)  $D < d$ , b)  $D > d$



Rys. 5. Powierzchnia utworzona z palisady małych wałków ustawionych prostopadle do płaszczyzny rysunku w dwóch rzędach na obwodzie uchwytu karuzelowego

Z przedstawionego opisu wynika, że przy natryskiwaniu powierzchni walcowych, jeżeli średnica strugi ( $d$ ) jest mniejsza od średnicy wałka ( $D$ ) to strumień opływający wałek  $m_{op}$  jest równy zero, a gdy średnica strugi ( $d$ ) jest większa od średnicy wałka ( $D$ ) to strumień opływający wałek  $m_{op}$  jest równy:

$$m_{op} = m_c \left( \frac{\frac{1}{2} d^2 \arccos\left(\frac{D}{d}\right) - \frac{1}{2} D \sqrt{d^2 - D^2}}{\frac{1}{2} \pi d^2} \right), \quad (12)$$

uwzględniając zmienność kąta nachylenia powierzchni, strumień prostopadły do powierzchni określa związek:

$$m_p = m_d \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \frac{f(\alpha)}{d} dr, \quad (13)$$

w którym:

$$\alpha = \arcsin(2r/D), \quad r = -d/2 \dots d/2, \quad (14)$$

pozostałe strumienie obliczono z zależności podanych w p. 2.

Dane liczbowe uzyskane z obliczeń dla różnych średnic wałków od 1 mm do 50 mm natrykiwanych proszkiem ceramicznym  $Al_2O_3 + 13\%TiO_2$ , przy użyciu plazmotronu MIM40 (dla  $m_w = 0$ ,  $m_n = 0$ ,  $\Psi = 0,77$ ), zweryfikowano eksperymentalnie dla 3 średnic ( $D = 1,5$  mm; 20 mm; 50 mm), zestawiono w tabl. 1.

Tablica 1

Zestawienie wartości obliczeniowych i porównanie ich z danymi eksperymentalnymi

$D$ [mm]	1	1,5	Palisada wałków $\sigma = 1,5$	2	5	10	20	30	40	50
$\phi_{obl}$ w (%)	7,8	11,7	23,3	15,5	37,4	61,4	65,7	67,7	69,3	70,4
$\phi_{eks}$ w (%)	-	9,0	24,0	-	-	-	60,5	-	-	62,5
	$D < d$						$D > d$			

### 3. PODSUMOWANIE

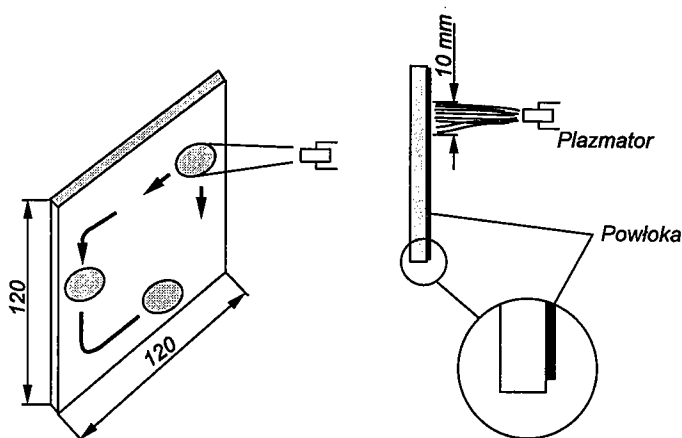
Przedstawiony w pracy model obliczeniowy pozwala określić wykorzystanie proszku, a przez to jego zapotrzebowanie w procesie natryskiwania plazmowego.

go powłoki na dowolnej powierzchni. Warunkiem uzyskania niezbędnych danych do modelu jest uprzedni test plazmotronu, w którym eksperymentalnie określa się wartość strumienia odbitego. W teście tym dla określonego proszku należy zastosować optymalne parametry zasilania plazmotronu.

Zaproponowany model użyto dla obliczenia wykorzystania proszku na różnych powierzchniach, a różnice z wyznaczonym eksperymentalnie są nieznaczne. Obliczeniowy stopień wykorzystania proszku dla powierzchni walcowych o średnicach mniejszych od średnicy strugi w miejscu natryskiwania różni się około 2%. Dla powierzchni walcowych o średnicach znacznie większych od średnicy strugi jest on kilka procent większy od eksperymentalnego.

## DODATEK 1. WYZNACZENIE STRUMIENIA ODBITEGO ( $m_{od}$ )

Znajomość strumienia odbitego jest ważnym elementem dla określenia przedstawionego bilansu. Strumień odbity wyznaczono dla przedstawionych warunków (jeżeli  $m_w = 0$  oraz  $S_1 < S_2$ , to  $m_{op} = 0$  i gdy  $\alpha = 0$  to  $m_s = 0$ , to  $m_p = m_d = m_c$ , więc  $m_{od} = m_c - m_t$ ). Schemat wyznaczenia strumienia odbitego przedstawiono na rys. D.1. Posuw plazmotronu był tak kontrolowany, że przekrój strugi nie wychodził poza obrys natryskiwanej powierzchni ( $m_n = 0$ ). Z uwagi na ustalony proces natryskiwania masa powłoki zależy liniowo od czasu i strumienia, a zatem spełniony jest warunek  $m_{od}(\tau) = m_c(\tau) - m_t(\tau)$ . Masy:  $m_c\tau$  oraz  $m_t\tau$  wyznaczono wagowo, a następnie określano stopień wykorzystania materiału  $\phi$  (przy powyższych warunkach jest on równy bezwymiarowemu współczynnikowi odbicia  $\Psi$ ).



Rys. D.1. Schemat eksperymentu do określania strumienia odbitego ( $m_{od}$ )



Proszek stanowiła alumina z domieszką dwutlenku tytanu ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\%\text{TiO}_2$ ), o granulacji  $30 \div 40 \mu\text{m}$ , proszek metaliczny stanowił stop chromowo-niklowy ( $\text{Ni20Cr}$ ) o granulacji  $30 \div 40 \mu\text{m}$ .

Dla każdego proszku dobierano parametry optymalne, które zapewniały dobre przetopienie ziaren, a jednocześnie minimalizowały strumień wyparowanego proszku.

Ostatecznie:

$$m_t = \Psi m_p, \quad (15)$$

natomiast

$$m_{\text{od}} = (1 - \Psi) m_p. \quad (16)$$

Tablica 2

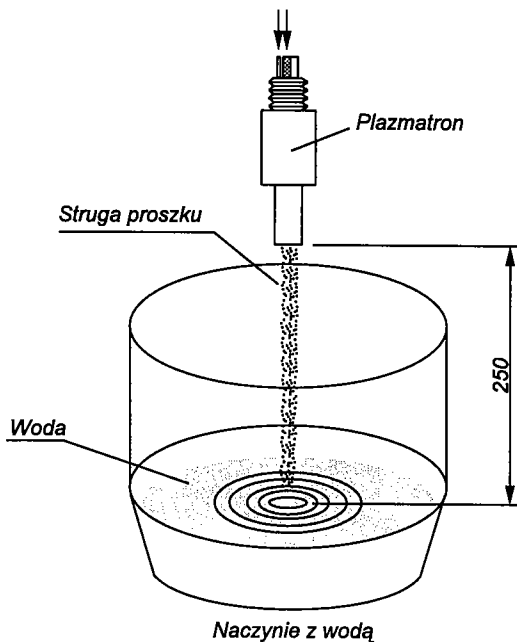
Wyniki współczynnika odbicia  $\Psi$  dla  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\%\text{TiO}_2$ , oraz  $\text{Ni20Cr}$  dla plazmotronu MIM-40

Materiał powłoki	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\%\text{TiO}_2$	NiCr
Moc	35 KW	14 KW
$\Psi$	77%	64%

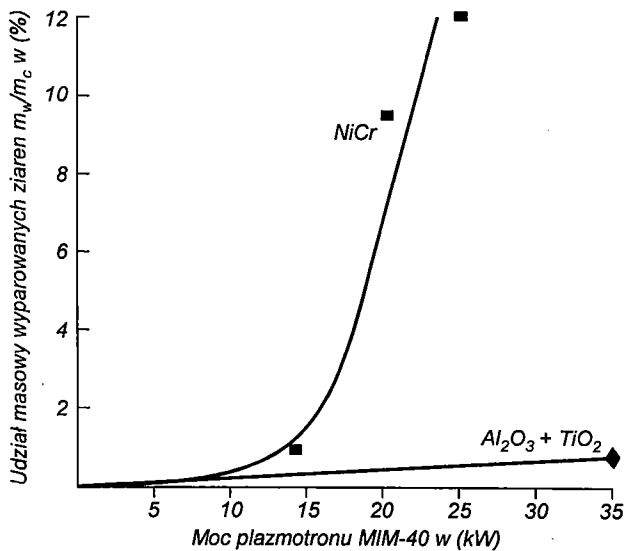
## DODATEK 2. WYZNACZENIE STRUMIENIA WYPAROWANEGO ( $m_w$ )

Część ziaren proszku podanego do plazmotronu może być nie tylko przetopiona, ale może osiągnąć temperaturę parowania i częściowo wyparować. Dla niektórych materiałów proszkowych może również wystąpić reakcja chemiczna rozpadu proszku na związki gazowe. Jest to wysoce prawdopodobne wówczas, gdy do plazmotronu jest dostarczana nadmierna moc, czego należy unikać.

Przeprowadzone badania eksperymentalne określały wyparowanie proszku o granulacji ziaren o wymiarach  $30 \mu\text{m}$  do  $40 \mu\text{m}$ , przy optymalnych parametrach. Schemat przeprowadzonego testu przedstawiony jest na rys. D.2. Zatrzymywany proszek w wodzie, znajdującej się w pokazanym na rysunku naczyniu, po eksperymencie i suszeniu, podlegał ważeniu ( $m_w \tau$ ). Ważono również podawany do plazmotronu proszek ( $m_c \tau$ ). Różnica określała strumień wyparowany. Przedstawione wyniki na rys. D.3 dotyczą proszku metalicznego ( $\text{NiCr}$ ), proszek ceramiczny ulega nieznacznemu wyparowaniu z uwagi na wysoką temperaturę parowania. Należy podkreślić, że w eksperymencie użyto proszki metaliczne i ceramiczne wymienione szczegółowo w Dodatku 1, które są chemicznie



Rys. D.2. Schemat eksperymentu do określania strumienia wyparowanego



Rys. D.3. Wyniki pomiarów strumienia wyparowanego

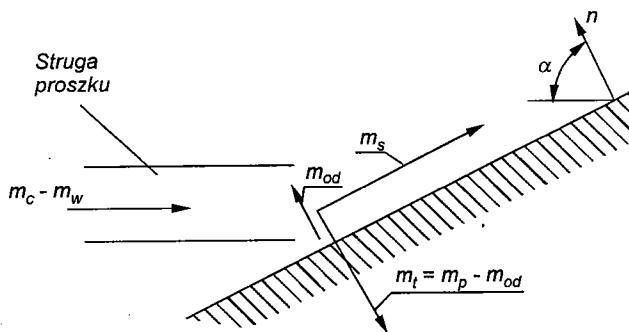
### DODATEK 3. WYZNACZENIE STRUMIENIA PROSTOPADŁEGO DO POWIERZCHNI ( $m_p$ )

Zgodnie z zasadami bilansowania strumienia wielkości skalarnej, jakim jest strumień masy, strumień dopływający do miejsca natryskiwania rozkłada się na strumień prostopadły i styczny. Schemat rozkładu tych strumieni przedstawiono na rys. D.4. Eksperyment przeprowadzono w sposób podobny do opisanego w Dodatku 1, przy zmianie kąta nachylenia powierzchni natrykiwanej. Ponieważ strumień odbity od powierzchni zależy głównie od jakości plazmotronu i rodzaju proszku, w eksperymencie tym wyznaczano strumień tworzący powłokę. Po zsumowaniu strumienia odbitego i tworzącego powłokę otrzymywano strumień prostopadły do powierzchni. Wyniki eksperymentalne przedstawia tabl. 3.

Ostatecznie strumień prostopadły do powierzchni oraz styczny wynoszą:

$$m_p = m_d f(\alpha), \tag{17}$$

$$m_s = m_d - m_p. \tag{18}$$



Rys. D.4. Schemat eksperymentu do określania strumienia prostopadłego do powierzchni

Tablica 3

Uzyskane wyniki  $m_p/m_d$  w zależności od kąta między normalną do powierzchni a osią strugi

$\alpha$ w °	0	30	30	45	45	60	90
$m_p/m_d$ w %	100	80,91	78,70	81,5	80,43	74,83	0

Uzyskane wyniki aproksymowano krzywą  $f(\alpha)$  w postaci wielomianu:

$$f(\alpha) = 0,999855 - \alpha \cdot 0,018739 + \alpha^2 \cdot 5,58201 \cdot 10^{-4} - \alpha^3 \cdot 5,26362 \cdot 10^{-6}. \tag{19}$$

---

# ANALYSIS OF POWDER USAGE IN A PLASMA SPRAYING PROCESS

## Summary

A mathematical model for calculation of a degree of usage a layer material in a process of its spraying on a subside body of an arbitrary shape in a plasmothron has been described in the paper. The material has been introduced into a plasmothron in a form of a powder. Calculations have been based on a balance of mass of the fed powder in the process. An account has been taken for a coefficient of reflection. Its value has been related both to a design of a plasmothron and to properties of the powder.