ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1978

Seria: Mechanika z.65 Nr kol.569

Józef GAWROŃSKI, Andrzej PILARZ

Instytut Odlewnictwa
Politechnika Śląska

TEORETYCZNE PODSTAWY OTRZYMYWANIA POWŁOK NA ODLEWACH PRZY WYKORZYSTANIU SIŁ ELEKTRODYNAMICZNYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono teoretyczne podstawy kierowania ruchem stałej cząstki w ciekłym metalu, dzięki połączonemu oddziaływaniu pola elektrycznego i magnetycznego na ten metal. Określono teoretycznie wielkość siły działającej na cząstkę, kierunek jej działania oraz prędkość ruchu cząstki. Wykonano badania modelowe, które potwierdziły słuszność analizy teoretycznej. Opisana analiza teoretyczna i badania modelowe są wstępnym etapem prac, mających na celu opracowanie technologii wytwarzania powłok kompozytowych na odlewach, polegającej na osadzeniu stałych cząstek na wybranej powierzchni odlewu dzięki wykorzystaniu sił elektrodynamicznych.

1. Wstęp

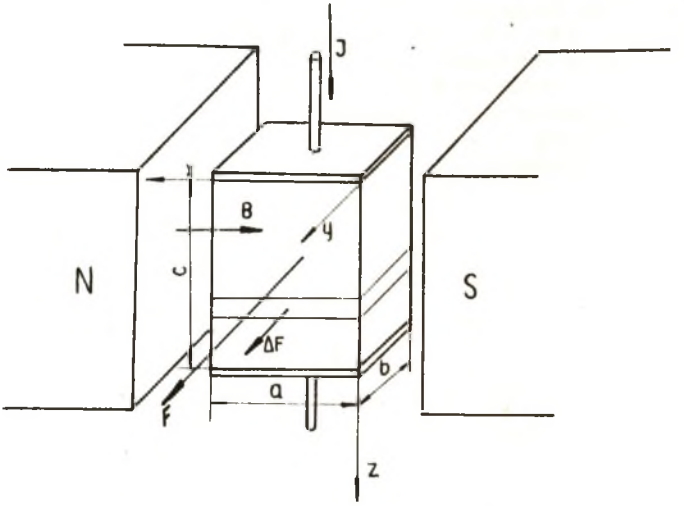
W ostatnich latach w związku z nieustanną koniecznością poprawy właściwości odlewów czynione są próby stosowania różnych oddziaływań fizycznych na ciekły lub krystalizujący metal. Wśród tych oddziaływań wymienić należy między innymi stosowanie drgań mechanicznych o częstotliwościach akustycznych, infradźwiękowych lub ultradźwiękowych, stosowanie stałych lub zmiennych pól magnetycznych, pól elektrycznych lub połączone oddziaływanie pól magnetycznych i elektrycznych. Połączone oddziaływanie pól magnetycznych i elektrycznych znajduje zastosowanie w urządzeniach zwanych urządzeniami kondukcyjnymi. Do urządzeń tego typu zaliczyć można pompy kondukcyjne do transportu ciekłego metalu, seperatory, krystalizatory kondukcyjne do ciągłego odlewania oraz urządzenia do prowadzenia krystalizacji przy połączonym oddziaływaniu pól magnetycznych i elektrycznych.

W Instytucie Odlewnictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach podjęto badania mające na celu stwierdzenie możliwości kierowania ruchem celowo wprowadzonych stałych cząstek do ciekłego metalu za pomocą połączonego oddziaływania pola magnetycznego i elektrycznego. Kierowanie ruchem cząstek może być szczególnie przydatne w prowadzeniu osadzania stałych cząstek w wybranych miejscach odlewu lub na jego powierzchni /otrzymywanie obszarów odlewu o budowie kompozytowej/ oraz przy równomiernym rozmieszczeniu cząstek w całej jego objętości co posiada podstawowe znaczenie np. w odlewaniu suspensyjnym.

Pierwszą częścią badań prowadzonych w tym zakresie było opracowanie teoretycznych podstaw analizy ruchu cząstki oraz prowadzenie wstępnych badań modelowych mających potwierdzić słuszność przeprowadzonej analizy teoretycznej. Wyniki badań modelowych będą sprawdzianem możliwości zastosowania opracowanej metody w zagadnieniach praktycznych.

2. Teoretyczne podstawy analizy ruchu cząstki

Aby przeprowadzić analizę ruchu cząstki koniecznym jest uczynienie pewnych założeń wstępnych upraszczających analizę. Jako podstawę analizy przyjmiemy rys.1.



Rys.1. Element metalu umieszczony w stałym polu magnetycznym, przez który przepływa prąd elektryczny

Na rysunku tym przedstawiono element ciekłego metalu. Zakładamy, że element ten znajduje się w stałym, jednorodnym polu magnetycznym o indukcji B. Poprzez metal przepływa prąd stały o natężeniu I. Zakładamy, że w następstwie przepływu prądu w objętości metalu powstaje pole elektryczne jednorodne. Zakładamy także brak ruchu ciekłego metalu. Założenie to, mimo, że jest dalekim od rzeczywistości, nie wprowadza istotnego błędu do analizy i możemy je przetransformować do ruchomego układu współrzędnych poruszającego się wraz z metalem. Poczynione założenia posiadają swe uzasadnienie, głównie w oparciu o dostępne opracowania literaturowe.

Dla przyjętego, jak na rysunku zwrotu wektora indukcji magnetycznej B i kierunku przepływu prądu, powstanie siła elektrodynamiczna F zwrócona zgodnie z osią y. Siła ta spowoduje powstanie dodatkowego ciśnienia działającego w płaszczyźnie xz.

Wielkość gęstość prądu w objętości metalu wyniesie:

$$j = \frac{I}{ab} \qquad /1/$$

Jeśli dokonamy podziału ciekłego metalu na elementy o wysokości Δz, to siła ΔF wywierana na boczną powierzchnię formy wyniesie

$$\Delta F = B \cdot I \cdot \Delta z \qquad /2/$$

a ciśnienie będące skutkiem oddziaływania tej siły

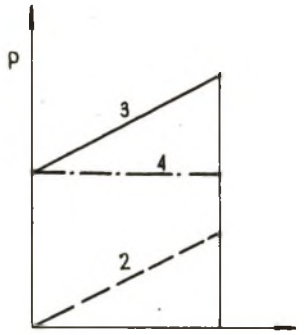
$$\Delta p = \frac{\Delta F}{\Delta z \cdot a} = \frac{B \cdot I}{a} \qquad /2'/$$

Z powyższej zależności wynika, że ciśnienie jest stałe na całej powierzchni xz metalu /pomijając ciśnienie metalostatyczne/. Całkowite ciśnienie będzie więc sumą ciśnienia metalostatycznego i ciśnienia powstałego w wyniku oddziaływania sił elektrodynamicznych.

$$p = z.\varrho \cdot g + \frac{BI}{a}, \qquad /3/$$

gdzie ϱ - gęstość metalu

Na rys.2 przedstawiono rozkład poszczególnych ciśnień oraz ciśnienia całkowitego jako funkcję wysokości odlewu



Rys.2.Rozkład ciśnienia w metalu jako funkcja wysokości:
1 - Ciśnienie elektrodynamiczne
2 - Ciśnienie metalostatyczne
3 - Ciśnienie całkowite

Przeanalizujemy zjawiska towarzyszące umieszczonej w objętości ciekłego metalu stałej cząstki prostopadłościennej o innej przewodności właściwej elektrycznej, niż przewodność ciekłego metalu i o innej masie właściwej.

Rysunek 3 przedstawia cząstkę o wymiarach $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ wprowadzoną do ciekłego metalu. Na element ten będzie działać siła wyporu równa

$$\Delta W = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \varrho \cdot g \qquad /4/$$

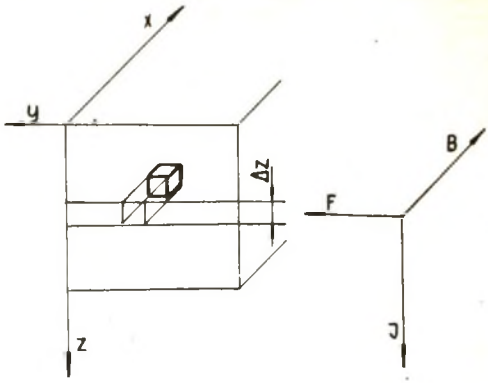
oraz siła ciężkości

$$\Delta G = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \varrho_1 \cdot g \qquad /5/$$

Wypadkowa siła w kierunku pionowym wyniesie:

$$\Delta P = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot g\,/\varrho_1 - \varrho/ = g\,/\varrho_1 - \varrho/\Delta V, \qquad /5'/$$

gdzie: ΔV - objętość cząstki
ϱ_1 - masa właściwa cząstki



Rys.3. Stała cząstka w ciekłym metalu

Ponieważ założono stałą gęstość prądu w całej objętości metalu w celu określenia wielkości siły elektrodynamicznej działającej na cząstkę przewodzącą, określimy różnicę potencjałów występującą pomiędzy ściankami cząstki równoległymi do płaszczyzny xy.

Napięcie pomiędzy elektrodami doprowadzającymi prąd do metalu wyniesie:

$$U = I \cdot R = J \cdot \frac{\sigma \cdot c}{ab} \qquad /6/$$

gdzie: σ - oznacza oporność właściwą metalu

$$\text{ponieważ } \sigma = \frac{1}{\gamma} \text{ to } U = \frac{I \cdot c}{\gamma ab}, \qquad /6'/$$

gdzie: γ - przewodność elektryczna właściwa metalu

Natężenie pola elektrycznego E wewnątrz metalu wyniesie:

$$E = \frac{U}{C} = \frac{I}{\gamma ab} \qquad /7/$$

Ponieważ pomiędzy gęstością prądu a natężeniem pola istnieje związek

$$j = \gamma \cdot E \qquad /8/$$

to korzystając ze wzoru /7/ możemy określić gęstość prądu j_1 płynącego poprzez cząsteczkę

$$j_1 = \gamma_1 E = \frac{I \cdot \gamma_1}{ab} \qquad /8^1/$$

Wobec tego prąd Δ I płynący poprzez cząstkę wyniesie:

$$\Delta I = \gamma_1 \cdot \Delta x \cdot \Delta y$$

$$\Delta I = \frac{I \cdot \gamma_1 \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{\gamma ab} \qquad /9/$$

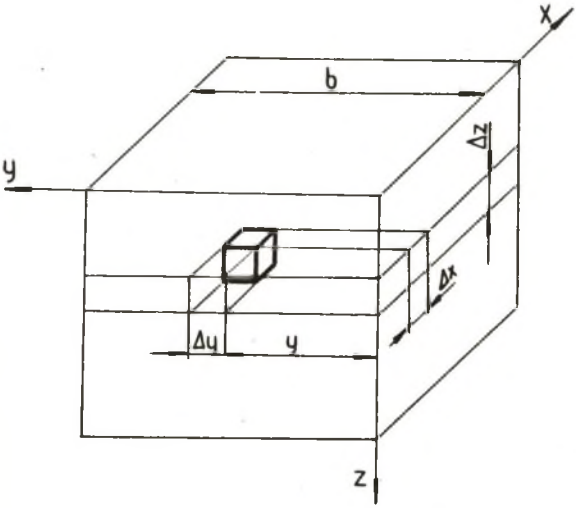
Na cząstkę tą zadziała więc siła elektrodynamiczna F

$$\Delta F = B \cdot \Delta I \cdot \Delta z \qquad /10/$$

lub

$$\Delta F = \frac{B I \cdot \Delta V}{ab} \cdot \frac{\gamma_1}{\gamma} \qquad /10'/$$

Rozpatrując działanie sił w kierunku poziomym należy wziąć pod uwagę to, że na płaszczyznę cząstki o wymiarach Δx i Δz działa również siła będąca następstwem istnienia sił elektrodynamicznych w ciekłym metalu. Wielkość tego oddziaływania znajdziemy posługując się rys.4. Dla układu współrzędnych, jak na rysunku można przyjąć, że na powierzchniach cząstki równoległych do płaszczyzny xz występuje różnica ciśnień równa różnicy ciśnień w płaszczyznach równoległych do płaszczyzny xz i odległych od niej o y i $y+\Delta y$.

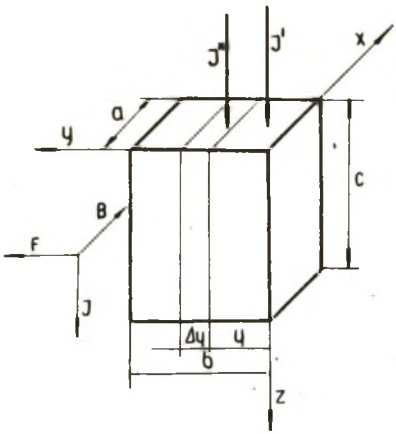


Rys.4. Położenie cząstki w ciekłym metalu

Ciśnienia w tych płaszczyznach obliczamy korzystając z rys.5. Rozdzielimy wartość natężenia prądu na części I' i I" przepływające poprzez elementy metalu pokazane na rys.5. Ponieważ napięcie pomiędzy elektrodami wynosi:

$$U = \frac{I \cdot c}{\gamma ab} \qquad /11/$$

To natężenie prądu I' wyniesie



Rys.5. Schemat do wyznaczenia różnicy ciśnień w płaszczyznach odlewu odległych o Δy

$$I' = \frac{\frac{I\,c}{\gamma\, ab}}{\frac{c}{\gamma\, ay}} = \frac{I \cdot y}{b} \qquad /12/$$

i podobnie

$$I'' = \frac{I(y + \Delta y)}{b} \qquad /12'/$$

Ciśnienie wywołane siłami elektrodynamicznymi w metalu w płaszczyźnie odległej o Δy od płaszczyzny xz wynosi:

$$p' = \frac{F'}{a \cdot c} = \frac{B\,I'\,c}{a \cdot c} = \frac{B\,I\,y}{ab} \qquad /13/$$

a w płaszczyźnie odległej o $y + \Delta y$

$$p'' = \frac{B\,I\,(y + \Delta y)}{ab} \qquad /13'/$$

Różnica ciśnień pomiędzy tymi płaszczyznami:

$$\Delta p = p' - p'' = \frac{BI\,(y + \Delta y)}{ab} - \frac{BIy}{ab}$$

$$\Delta p = \frac{B\,I\,\Delta y}{ab} \qquad /14/$$

Na cząstkę działa więc siła w kierunku osi y o wielkości:

$$\Delta F_p = \Delta p \cdot \Delta x \cdot \Delta z$$

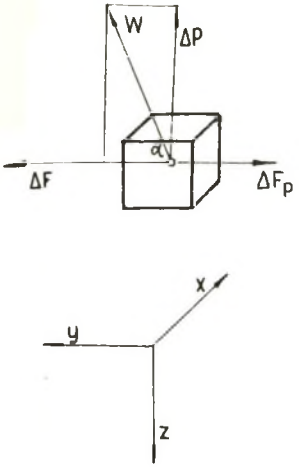
$$\Delta F_p = \frac{B \cdot I \cdot \Delta y}{ab} \cdot \Delta x \cdot \Delta z = \frac{B\,I}{ab} \Delta V \qquad /15/$$

Całkowita siła działająca na cząsteczkę będzie więc wypadkową trzech sił: siły ΔP w kierunku pionowym, siły elektrodynamicznej ΔF i siły ΔF_p pochodzącej z różnic ciśnień cieczy będącej następstwem występowania sił elektrodynamicznych w ciekłym metalu.

Oddziaływanie tych sił przedstawiono na rys.6.

Wielkość siły wypadkowej W wyniesie

$$W = \sqrt{(\Delta P)^2 + (\Delta F - \Delta F_p)^2} \qquad /16/$$



Rys.6.Siły działające na stałą cząstkę

Podstawiając uprzednio wartości sił otrzymamy:

$$W = \sqrt{g^2(\varrho_1 - \varrho)^2 + \frac{B^2 I^2}{a^2 b^2}\left(\frac{\gamma_1}{\gamma} - 1\right)^2} \cdot \Delta V \qquad /16'/$$

Kąt, pod którym będzie działać siła, wyliczyć można z zależności:

$$tg\alpha = \frac{\Delta P}{\Delta F - \Delta F_p} \qquad /17/$$

$$tg\alpha = \frac{g(\varrho_1 - \varrho)\cdot\gamma\cdot ab}{BI(\gamma_1 - \gamma)} \qquad /17'/$$

stąd

$$\alpha = arc\ tg\left[(\varrho_1 - \varrho\frac{\gamma}{\gamma_1 - \gamma}\ \frac{g\,ab}{B\,I}\right] \qquad /18/$$

z zależności powyższej wynika, że kąt działania siły wypadkowej nie zależy od objętości cząsteczki ani od jej wymiarów.

2.1. Ruch cząsteczki w ciekłym metalu

Pod wpływem uprzednio określonej siły cząstka będzie przemieszczać się w ciekłym metalu. Jeśli założmy kulisty kształt cząstki, to siła oporu określona będzie wzorem Stokesa

$$F_o = 6\pi\eta RV,$$

gdzie: η - lepkość ciekłego metalu,

R - promień cząstki kulistej,

V - prędkość ruchu.

Prędkość, po ustaleniu się warunków ruchu wyniesie

$$V = \frac{2R^2\sqrt{g^2(\varrho_1 - \varrho)^2 + \frac{B^2 I^2}{a^2 b^2}\left(\frac{\gamma_1}{\gamma} - 1\right)^2}}{g}$$

Wszystkie wyprowadzone zależności pozwalają nam sądzić o charakterze ruchu stałej cząstki znajdującej się w ciekłym metalu poddanego połączonemu oddziaływaniu pola elektrycznego i magnetycznego. Ze względu na poczynione wstępne założenia, wielkości wyliczone z wyprowadzonych wzorów są obarczone pewnym błędem lecz poczynione badania wstępne wykazały, że błąd ten jest niewielki i wobec czego określenie parametrów ruchu cząstek na drodze analitycznej w podany sposób może być przydatne w próbach zastosowań praktycznych.

3. Badania własne

W celu przeprowadzenia badań mających na celu sprawdzenie prawdziwości wyprowadzonych zależności teoretycznych w Instytucie Odlewnictwa Politechniki Śląskiej skonstruowano stanowisko badawcze. Zasadniczymi elementami tego stanowiska są:

a/ elektromagnes o szerokości szczeliny pomiędzy nadbiegunnikami 150 mm. Elektromagnes posiada uzwojenie wykonane z drutu miedzianego o średnicy 3 mm i ilości zwojów n = 2800. Elektromagnes ten pozwala na uzyskanie stałego pola magnetycz- o indukcji 0 - 1,3 Tesli.

b/ zasilacz elektromagnesu, w skład którego wchodzą:
- autotransformator trójfazowy o mocy 3 x 2 kW o napięciu wyjściowym regulowanym w zakresie 0 do 250 V.
- zespół diod prostowniczych 6 x BY2002R
- zespół kondensatorów filtrujących 20x400 μF w połączeniu równoległym.

Zasilacz ten pozwala na dostarczenie do elektromagnesu prądu stałego o natężeniu regulowanym płynie w zakresie od 0 do 50 A.

c/ zasilacz prądu niskiego napięcia, w skład którego wchodzą:
- autotransformator jednofazowy o mocy 2 kW i napięciu wyjściowym regulowanym płynie w zakresie od 0 do 250 V
- transformator 220 V/5V o obciążalności uzwojenia wtórnego 1200 A
- zespół diod prostowniczych 2xBY2002R w połączeniu równoległym.

Zasilacz ten pozwala na uzyskanie prądów zmiennych o natężeniach do 1200 A lub stałych do 400 A /krótkotrwałe 600 A/

Ze względu na ograniczone wymiary przestrzeni pomiędzy nadbiegunnikami do badań wstępnych użyto skrzynek formierskich o wymiarach 150x150x180 mm wykonanych z drewna. Odlew próbny miał kształt prostopadłościanu o wymiarach 50x50x80 mm. W trakcie formowania w przestrzeni wnęki formy umieszczano dwa płaskowniki /elektrody/ miedziane o przekroju 32 mm^2. Do wstępnych modelowych badań użyto jako metalu osnowy, stopu ołowiu, cyny i kadmu o temperaturze topnienia około 180°C. W czasie trwania prób do stopu tego wprowadzano śrut miedziany o średnicy ziarna około 0,8 mm.

3.1. Sposób prowadzenia badań

Przed przystąpieniem do zalewania formy metalem przygotowano śrut miedziany w sposób następujący: powierzchnię ziarn śrutu wytrawiono w 30% roztworze kwasu solnego, a następnie przemyto w 20% roztworem chlorku cynku. Powyższe czynności miały na celu ułatwienie zwilżenia powierzchni śrutu przez stop. Przygotowanie śrutu odbywało się równocześnie z topieniem metalu. Po stopieniu metalu w ilości potrzebnej do

wypełnienia jednej formy i przegrzaniu do temperatury 250°C, wsypywano do niego przygotowany śrut o masie około 100 g. Po zamieszaniu zawartości tygla metal wlewano do formy umieszczonej w polu magnetycznym i włączano zasilacze. Krzepnący odlew znajdował się w polu magnetycznym aż do chwili zakrzepnięcia w całej objętości. Po ostygnięciu odlew wybijano z formy i cięto w płaszczyznach prostopadłych i równoległych do jego osi w celu ujawnienia rozkładu śrutu w jego objętości. Próby przeprowadzano stosując różne wartości indukcji pola magnetycznego, różne wartości natężeń prądów przepływających przez metal oraz różne temperatury zalewania.

3.2. Analiza wyników badań

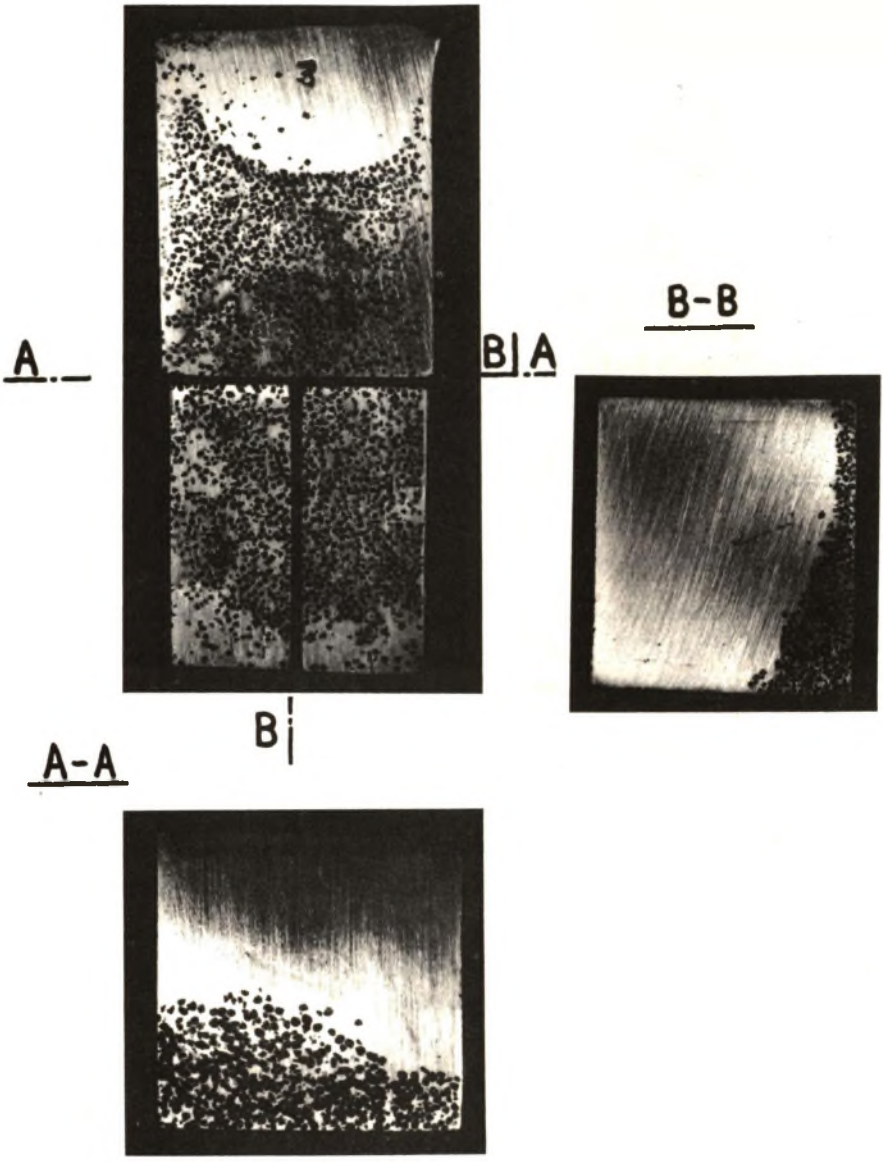
Na podstawie obserwacji przekrojów próbek odlewanych w polu magnetycznym stwierdzić można, że wyniki prób potwierdzają słuszność teoretycznych rozważań. We wszystkich próbkach stwierdzono niesymetryczny rozkład śrutu miedzianego w objętości odlewu. Rozkład śrutu w płaszczyźnie przekroju wybranego odlewu przedstawiają rys.7,8,9. We wszystkich przypadkach stwierdzić można wpływ oddziaływania pola magnetycznego na osadzanie wprowadzonych dodatków do metalu - osnowy.

4. Wnioski

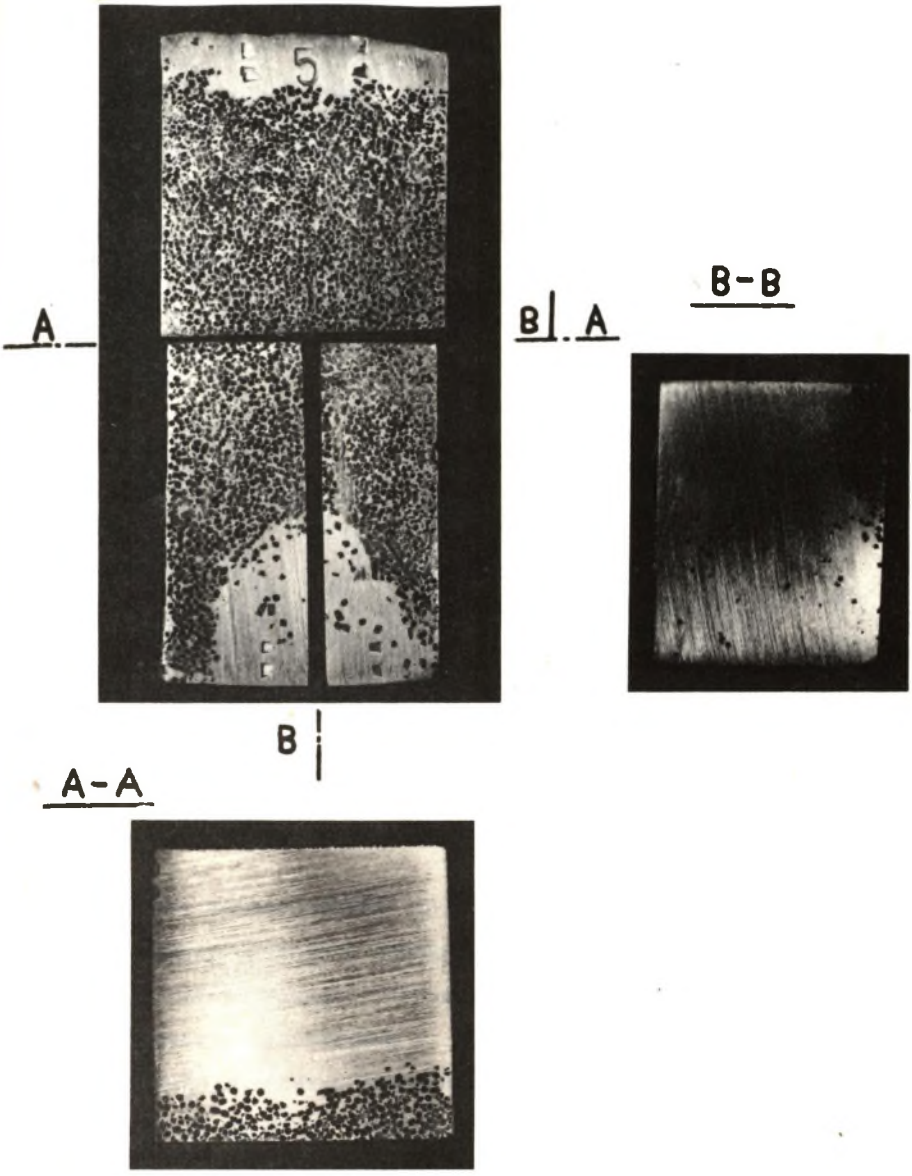
Opracowanie teoretyczne procesu osadzania dodatków wprowadzanych do metalu krzepnącego w polu magnetycznym jest podstawą do realizacji następnych prób, mających w ostatecznym efekcie umożliwić opanowanie nowej technologii uszlachetniania odlewu.

Wstępne przeprowadzone próby wykazały, że opracowanie teoretyczne jest słuszne i jest możliwe kierowanie ruchem cząstki znajdującej się w ciekłym metalu, czego ostatecznym efektem może być osadzenie jej w żądanym miejscu odlewu.

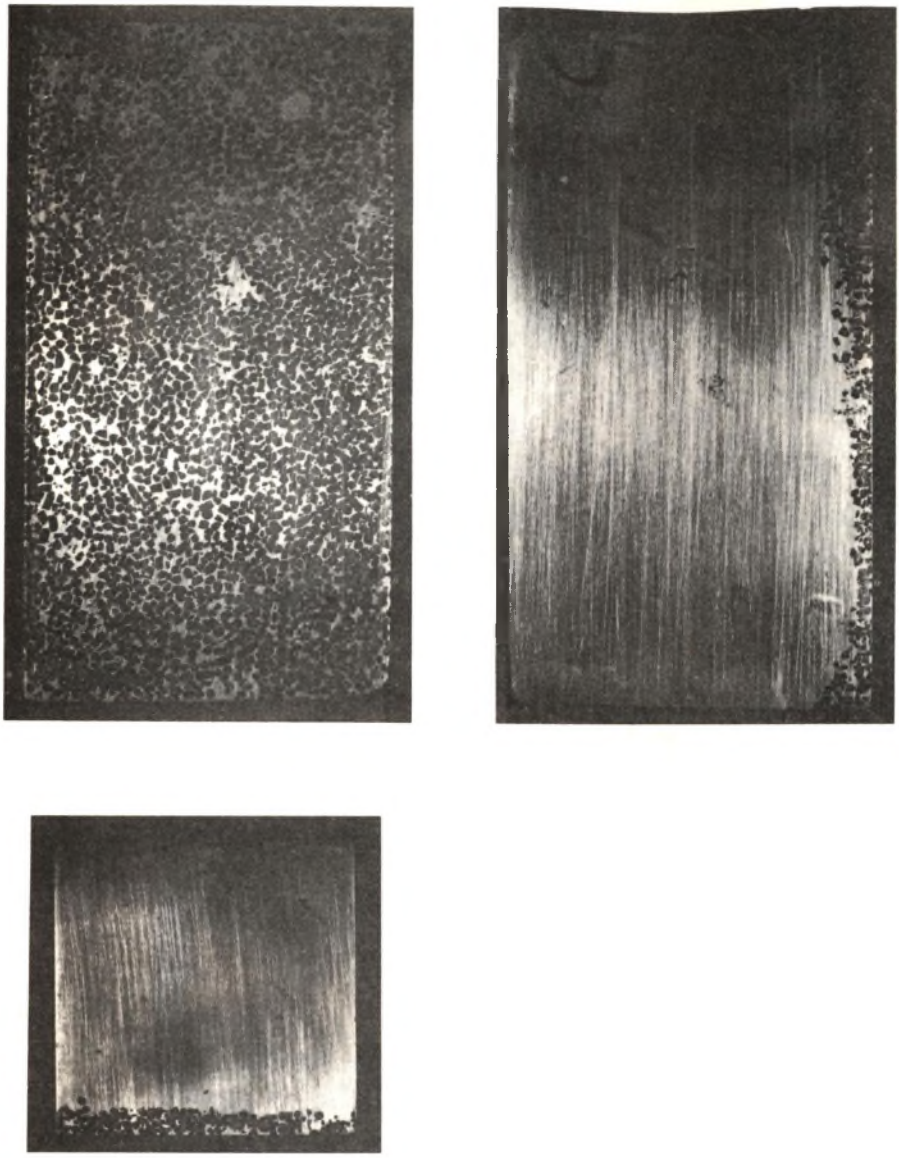
Powyższe opracowanie stanowi opis wstępnych prac, mających na celu ułatwienie realizacji pozostałych etapów badań.



Rys.7. Rozmieszczenie cząstek w objętości odlewu dla niewielkich wartości iloczynu B:I



Rys.8. Rozmieszczenie cząstek w objętości odlewu dla dużych wartości B.I /widoczne zgromadzenie się cząstek w górnej strefie odlewu/



Rys.9. Równomierne rozmieszczenie cząstek na wybranej bocznej powierzchni odlewu prostopadłościennego /dla B.I = 0,3T · 350A/

LITERATURA

1. Gielfgat J.: Żidkij mietał pod diejstwiem elektromagnitnych sił. Znanie. Ryga 1975
2. Dudziewicz J.: Podstawy elektromagnetyzmu. WNT, Warszawa 1972.
3. Poliszczuk W.: Modernizirowannsja ustanowka MDN 6 dla elektromagnitnogo dozirowania aluminijewych i ciskowych spławow. Litiejnoje proizwodstwo nr 11/1974.
4. Gawroński J., Pilarz A., Misera F.: Możliwości wykorzystania sił pola magnetycznego w procesie krystalizacji odlewu. Materiały III Sympozjum Naukowego AGH z okazji Dnia Odlewnika, Kraków 1977.

THEORETICAL PRINCIPLES OF PRODUCTION OF COATINGS ON CASTINGS WITH THE USE OF ELECTRODYNAMIC FORCES

Summary

The paper presents theoretical principles of control of the motion of a solid particle in liquid metal by means of combined action of electric and magnetic fields on the metal. Theoretical evaluation was made of the force acting on a particle, direction of the action and velocity of the particle. Theoretical considerations were confirmed by experiments on a model. The theoretical analysis and model experiments form a preliminary stage of works aimed at development of a technique for preparation of composite coatings on castings by means of application of electrodynamic forces for deposition of solid particles on a selected surface of a casting.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ОТЛИВКАХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ

Резюме

В статье даются теоретические основы управления движением твердой частицы в жидком металле благодаря одновременному взаимодействию электрического и магнитного полей на металл. Теоретически определено величину силы, действующей на частицу, направление ее действия, а также скорость движения частицы. Проведено модельные исследования, которые подтвердили правильность теоретического анализа. Описанный теоретический анализ и модельные исследования являются предварительным этапом работ с целью разработки технологии получения композиционных покрытий на отливках, которая заключается в том, что благодаря использованию электродинамических сил твердые частицы осаждаются на выбранной поверхности отливки.