

Józef GAWROŃSKI

Andrzej PILARZ

Jan SZAJNAR

WYKORZYSTANIE DRGAŃ INDUKOWANYCH PRZEZ SIŁY ELEKTRODYNAMICZNE PRZY ODLEWANIU STOPÓW ALUMINIUM

Streszczenie. W opracowaniu przedstawiono teoretyczne podstawy indukowania drgań za pomocą zmiennego pola magnetycznego i przepływu zmiennego prądu przez ciekły metal. Przeprowadzono badania wstępne, określające przydatność tej metody do podwyższania jakości tworzyw odlewniczych poprzez rozdrobnienie struktury w procesie krzepnięcia odlewu. Dokonano wyboru układu elektrod najefektywniej oddziałujących na przepływ metali.

1. PODSTAWY TEORETYCZNE PROCESU

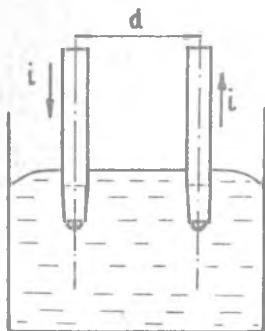
Rozpuszczanie się penetratorów w czasie przekazywania drgań do ciekłego metalu przedstawione w pracach [1, 2, 3, 4] oraz inne niedogodności wynikłe z układu przetwornik - kondensator - penetrator - ciekły metal, skłoniły autorów [1] do poszukiwań nad innymi sposobami generowania i wprowadzania drgań do ciekłego metalu.

W Instytucie Odlewnictwa Politechniki Śląskiej podjęto badania nad wytworzeniem w ciekłym metalu drgań i mieszania wokół dwóch zanurzonych elektrod, między którymi przepływa prąd o żądanym natężeniu i częstotliwości (rys. 1). Przepływający przez elektrody prąd wytwarza wokół nich pole magnetyczne, którego natężenie ma rozkład przedstawiony na rys. 2. Wartość natężenia pola magnetycznego można określić następującym wzorem:

$$H = \frac{i}{\pi} \cdot \frac{2}{\frac{2}{d} - \frac{2}{4x^2}} \quad (1)$$

Rozkład wielkości wektora indukcji \vec{B} ma taki sam przebieg jak na rys. 2, co wynika ze wzoru:

$$B = \mu_0 \cdot \mu \cdot H, \quad (2)$$

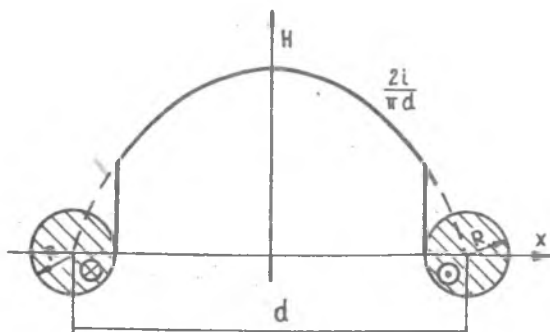


Rys. 1. Schemat układu elektrody - ciekły metal

gdzie:

μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$),

μ - przenikalność magnetyczna względna (dla ciekłego metalu wynosi ok. 1).

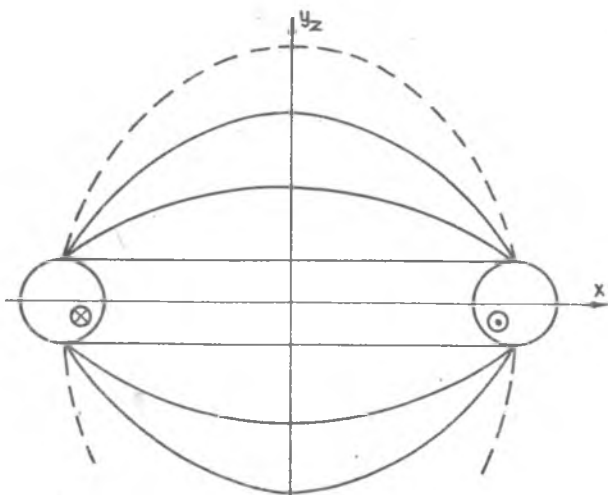


Rys. 2. Rozkład natężenia pola magnetycznego

Po podstawieniu (1) do (2) otrzymamy wyrażenie:

$$B = \frac{\mu_0 i^2}{\pi} \cdot \frac{2id}{d^2 - 4x^2} \quad (3)$$

Elektrody zanurzone w ciekłym metalu doprowadzają prąd o natężeniu i . Rozkład gęstości prądu w objętości metalu będzie zróżnicowany, zatem i



Rys. 3. Rozkład prądu w ciekłym metalu między elektrodami

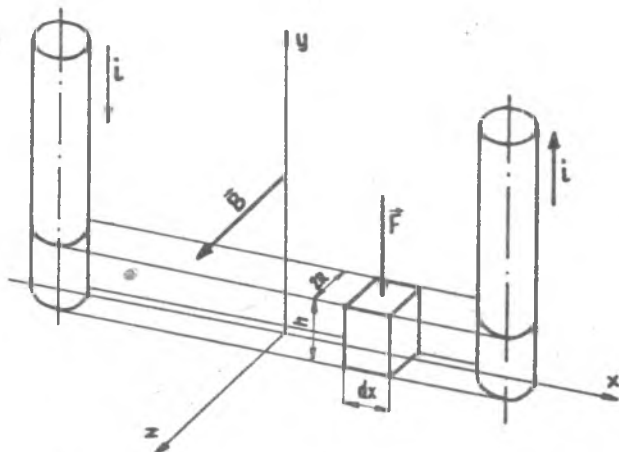
pole elektryczne będzie niejednorodne (rys. 3). Wielkość gęstości prądu będzie funkcją natężenia prądu przepływającego przez elektrody:

$$j = k \cdot i, \quad (4)$$

gdzie:

j - wielkość wektora gęstości prądu w przestrzeni między elektrodami,
 k - współczynnik uwzględniający rozptył prądu w objętości metalu (możliwy do wyznaczenia na drodze analitycznej).

Wydzielimy z rozpatrywanej przestrzeni element o objętości $h \cdot 2R \cdot dx$ (rys. 4).



Rys. 4. Element metalu między elektrodami

Na element ten zadziała siła elektrodynamiczna określana zależnością:

$$F = B \cdot I \cdot dx, \quad (5)$$

gdzie:

I - natężenie prądu przepływającego przez element,
 dx - element długości.

Ponieważ z definicji gęstości prądu wynika, że:

$$j = \frac{I}{S}$$

zatem

$$I = j \cdot S = j \cdot h \cdot 2R$$

lub

$$I = k \cdot i \cdot 2hR.$$

Wielkość siły oddziałującej na element wyniesie:

$$F = B \cdot 2ihRk \quad (6)$$

Jeżeli teraz do wyrażenia (6) wstawimy zależność (3), otrzymamy wzór określający siłę działającą na wyodrębniony element objętości:

$$F = \frac{4\mu_0 \mu_d kh R i^2 dx}{d^2 - 4x^2} \quad (7)$$

Zwrot siły można ustalić na podstawie reguły "lewej dłoni". Dla elektrod na rys. 4 siła F zwrócona będzie zawsze w dół, niezależnie od kierunku przepływu prądu.

Następstwem oddziaływania siły jest powstanie w objętości ciekłego metalu pola ciśnień. Ciśnienie wywierane na podstawie wybranego elementu wyniesie:

$$p = \frac{F}{2R \cdot dx} = \frac{2\mu_0 \mu_d kh k i^2}{\pi(d^2 - dx^2)} \quad (8)$$

Jeżeli wprowadzimy stałą C otrzymamy:

$$p = C \frac{d \cdot i^2}{d^2 - 4x^2} \quad (9)$$

W przypadku przepływu prądu sinusoidalnie zmiennego, dla którego wartość prądu określa równanie:

$$i = i_0 \sin(\varphi_0 + 2\pi ft)$$

wielkość powstającego ciśnienia określi zależność:

$$p = C \frac{d \cdot i_0^2 \sin^2(\varphi_0 + 2\pi ft)}{d^2 - 4x^2} \quad (10)$$

Z zależności (9) i (10) wynika:

1. Wielkość ciśnienia, powstałego w wyodrębnionej objętości ciekłego metalu znajdującej się między elektrodami, zależy tylko od położenia punktu na linii łączącej elektrody.
2. Ciśnienie w każdym punkcie będzie zmienne w czasie, a częstotliwość zmian będzie identyczna z częstotliwością prądu przepływającego przez elektrody i ciekły metal.

W następstwie okresowej zmiany ciśnienia w metalu powstaną drgania o częstotliwości równej częstotliwości prądu przepływającego przez ciekły metal. W ciekłym metalu poza drganiami wystąpi również cyrkulacja (mieszanie) wynikała wskutek niejednorodności ciśnienia panującego w metalu. Cyrkulacja powoduje przemieszczanie ciekłego metalu z miejsc o najwyższym ciśnieniu (pomiędzy elektrodami) do miejsc o ciśnieniu najniższym (wokół elektrod).

Dotychczasowa analiza dotyczyła sytuacji, gdy pomiędzy elektrodami znajdował się metal o jednakowych własnościach w całej swojej objętości. Jeżeli w ciekłym metalu znajdzie się cząsteczka (np. pojedynczy zarodek krystalizacji) o innej przewodności elektrycznej właściwej niż ciekły metal, to również gęstości prądu w tych ośrodkach będą różne. W wyniku zróżnicowanej gęstości prądu siła działająca na cząsteczkę (zarodek krystalizacji) będzie inna, niż siła działająca na objętość metalu o tych samych wymiarach. Z tego też powodu pojedynczy zarodek krystalizacji będzie poruszał się ruchem drgającym względem ciekłego metalu. Ruch ten powodować będzie zmianę warunków krystalizacji na granicy kryształ - ciekły metal (cząsteczka - ciekły metal). Niezależnie od zmiany wywołanej okresowym opływaniem kryształu przez ciekły metal, przy odpowiednio dużych amplitudach może dochodzić do dyspergowania powstającego kryształu, przy czym każdy element zdyspergowanego kryształu może się stać nowym zarodkiem krystalizacji. Nastęstwem takiego oddziaływania jest rozdrobnienie struktury odlewu, co zostało potwierdzone w badaniach własnych.

Indukowanie drgań przez siły zmiennego pola magnetycznego i przepływ prądu przez metal łączą w sobie zarówno zjawiska występujące przy oddziaływaniu na ciekły metal tylko drganiami, jak również zjawiska towarzyszące intensywnemu mieszaniu.

W literaturze znane są inne metody ulepszania struktury wykorzystujące oddziaływanie pola magnetycznego na krzepnący odlew.

A.M. Ageev w pracy [6] przedstawił sposób wytwarzania drgań w ciekłym metalu za pomocą sił pola magnetycznego. Drgania indukowano wykorzystując współdziałanie stałego pola magnetycznego wytworzonego przez elektromagnes i zmiennego pola magnetycznego wytworzonego przez solenoid. Stosując taką metodę generowania drgań, zespół autorów [7] przeprowadził badania modelowe, mające na celu wyznaczenie optymalnych parametrów obróbki ciekłego metalu. Badania przeprowadzono na oleju transformatorowym, mającym lepkość zbliżoną do lepkości ciekłego metalu. W pracy wysunięto wniosek, że optymalnym wariantem obróbki jest oddziaływanie drganiami na ciekły metal w warunkach rezonansowych dla układu tygiel-metal. W takich warunkach do obrobionego metalu wprowadzić można maksimum energii drgań przy danych parametrach stałego i zmiennego pola magnetycznego.

W badaniach [8] przeprowadzonych na stopach Al-Cu i Al-Zn krzepnących pod działaniem wibracji w polu elektromagnetycznym stwierdzono znaczne rozdrobnienie ziarna, przy czym efekt był proporcjonalny do gęstości prądu, tj. do amplitudy drgań.

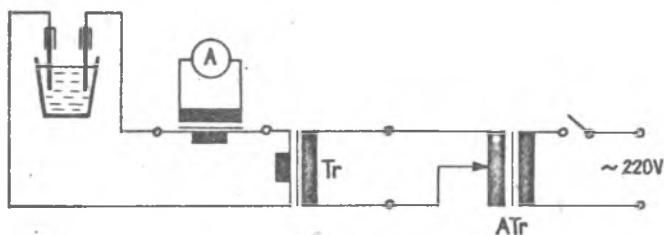
Metody wprowadzania drgań do ciekłego metalu bez pośrednictwa penetratora znaleźć mogą zastosowanie przemysłowe głównie ze względu na brak wad występujących przy klasycznym układzie przetwornik-koncentrator-penetrator a w szczególności na brak występowania rozpuszczającego się penetratora.

2. BADANIA WŁASNE

Celem badań własnych było stwierdzenie i określenie wpływu drgań i mieszania ciekłego metalu indukowanych za pomocą zmiennego pola magnetycznego i siły elektrodynamicznej na rozdrobnienie struktury metali stopów.

Ze względu na brak opracowań literaturowych na ten temat, brak było wskazówek w ustaleniu zakresu badań. W związku z tym badania rozpoczęto wg następującego planu:

- a) badania wstępne nowej metody, mające na celu stwierdzenie jej przydatności do podwyższenia, jakości tworzyw odlewniczych drogą rozdrobnienia struktury w procesie krzepnięcia odlewu,
- b) badania modelowe, których celem było opracowanie najefektywniej oddziałujących elektrod.



Rys.5. Schemat stanowiska badawczego indukującego drgania w ciekłym metalu

Badania realizowano za pomocą urządzenia przedstawionego na rys. 5, w skład którego wchodzi:

- autotransformator 0 - 250 V,
- transformator wysokoprądowy 0 - 1000 A,
- amperomierz,
- elektrody miedziane z końcówkami grafitowymi (rys. 8a).

Urządzenie wytwarza drgania o częstotliwości 50 Hz przy przepływie prądu przez ciekły metal w przedziale 0-1000 A.

Do badań stosowano aluminium hutnicze AD oraz stop PA2 o składzie (2-2,8)% Mg, (0,15-0,4)% Mn, reszta Al.

Metal topiono w piecu indukcyjnym tyglowym o pojemności 30 kg. Jako pokrycia używano topnik o składzie:

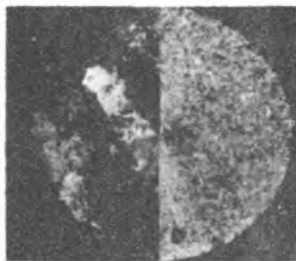
30% NaCl,
47% KCl,
23% Na_3AlF_6 ,

do rafinacji stosowano tabletki "RAFAL 4".

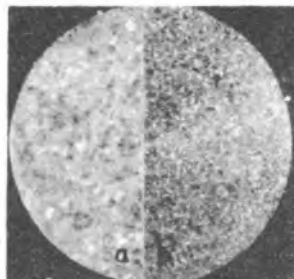
2.1. Badania wstępne

W celu stwierdzenia przydatności drgań indukowanych przez zmienne pole magnetyczne i przepływ prądu przez ciekły metal odlewano próbki o wymiarach \varnothing 60 x 60 mm, oddziałując na nie drganiami od chwili zalania, aż do całkowitego zakrzepnięcia metalu.

Próbki odlewano do form skorupowych z układem elektrod jak na rys. 8a. Efekt oddziaływania drgań porównywano z próbkami odlanymi w tych samych warunkach bez oddziaływania drgań. Odlane próbki przecinano w połowie wysokości, wykonując zglądy makroskopowe. Próbki trawiono odczynnikiem Tuckera. Wyniki badań przedstawiono na rys. 6 i 7.



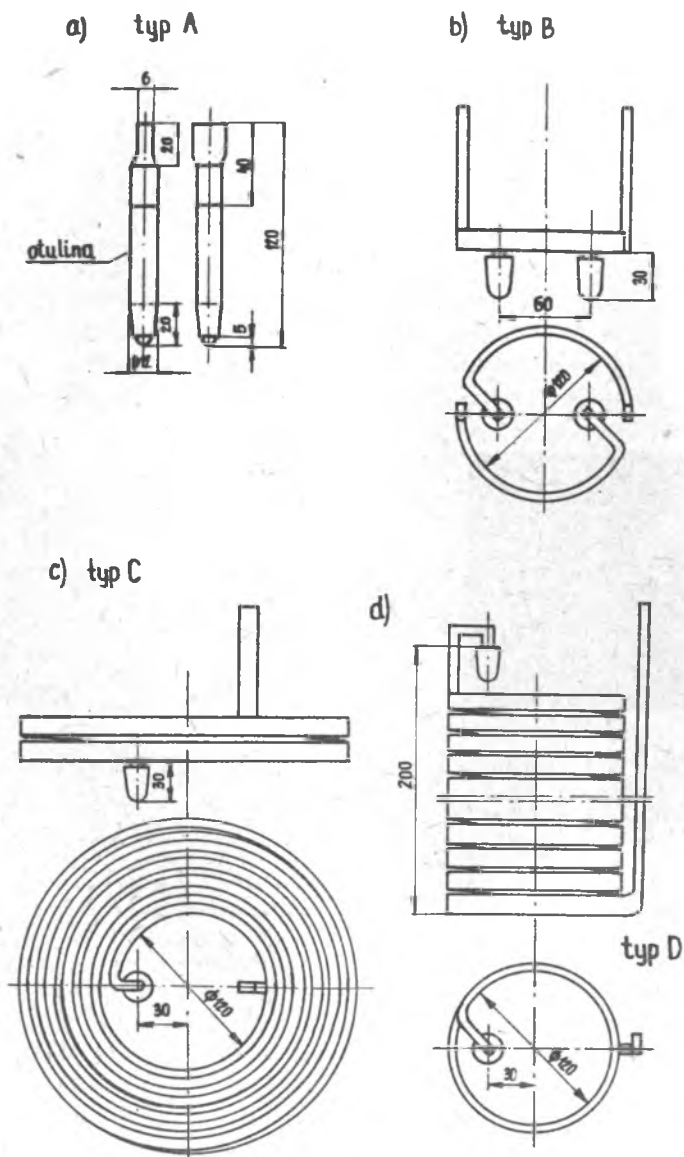
Rys. 6. Budowa makrostrukturalna odlewu z Al. $T_{\text{zal}} = 740^{\circ}\text{C}$,
a - bez drgań, b) z drganiami



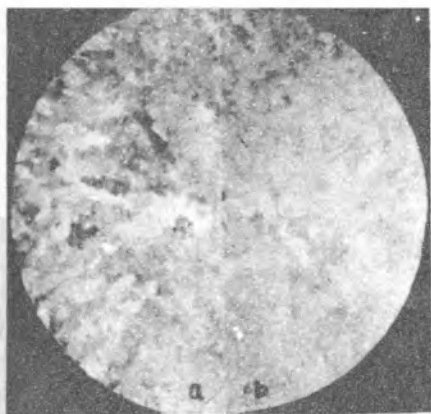
Rys. 7. Budowa makrostrukturalna odlewu z PA2. $T_{\text{zal}} = 760^{\circ}\text{C}$
a) bez drgań, b - z drganiami

2.2. Badania modelowe

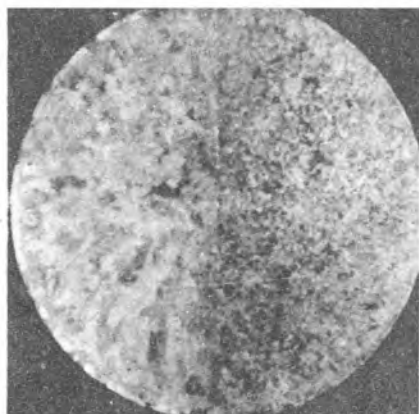
Zasadniczą część tego etapu badań prowadzono odlewając z aluminium A0 próbki o wymiarach \varnothing 100 x 200 mm. W czasie krzepnięcia wlewka oddziaływano na niego drganiami o częstotliwości 50 Hz przy różnych czasach oddziaływania, zmieniając przy tym wielkość natężenia prądu przepływającego przez ciekły metal. Zmieniano również układy elektrod przekazujące prąd do ciekłego metalu, stosując elektrody przedstawione na rys. 8. Próbki do zglądów makroskopowych pobierano w połowie wysokości próbki. Próbki trawiono odczynnikiem Tuckera. Wyniki badań przedstawiono na rys. 9-12.



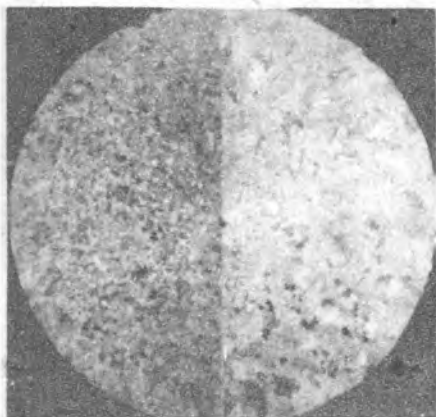
Rys. 8. Elektrody stosowane do badań modelowych



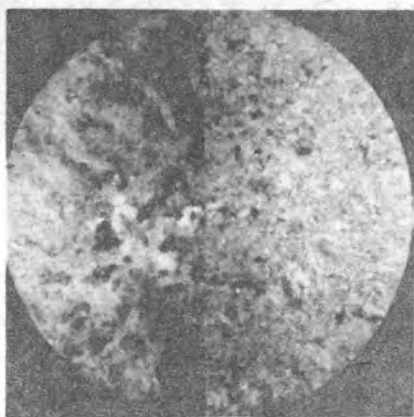
Rys. 9. Budowa makrostrukturalna próbki odlanej z Al. $T_{zal} = 760^{\circ}C$
 a) bez oddziaływania drgań - próbka kontrolna, b) z drganiami, elektrody typu A, $I = 700 A$, $t = 8 min$



Rys. 10. Budowa makrostrukturalna próbki odlanej z Al pod działaniem drgań. $T_{zal} = 760 C$
 a) elektrody typu B, $I = 700 A$, $t_{oddz.} = 8 min$, b) elektrody typu C i A, $I = 600 A$, $t_{oddz.} = 4 min$.



Rys. 11. Budowa makrostrukturalna próbki odlanej z Al pod działaniem drgań. $T_{zal} = 760^{\circ}C$
 a) elektrody C i A, $I = 600 A$, $t_{oddz.} = 8 min$, b) elektroda D wykorzystana jako solenoid, $I = 500 A$, $t_{oddz.} = 8 min$.



Rys. 12. Budowa makrostrukturalna próbki odlanej z Al pod działaniem drgań. $T_{zal} = 760^{\circ}C$
 a) elektrody D i A, $I = 600 A$, $t_{oddz.} = 8 min$, b) elektroda D wykorzystana jako cewka zasilana prądem zmiennym $L = 800 A$, całość umieszczona w stałym polu magnetycznym o $B = 0,5 T$, czas oddziaływania pół $t_{oddz.} = 8 min$.

2.3. Podsumowanie

Zarówno badania wstępne, jak i badania modelowe w pełni potwierdziły przydatność drgań indukowanych przez zmienne pole magnetyczne i przepływ prądu przez ciekły metal w odlewnictwie. Wyniki badań wskazują na ścisłe powiązanie między:

- natężeniem zmiennego pola magnetycznego wytwarzanego przez elektrody,
- rodzajem obrabianego metalu lub stopu,
- wielkością prądu przepływającego przez ciekły metal,
- objętością ciekłego metalu, w którym indukują się drgania.

W badaniach wstępnych to samo pole magnetyczne wytworzone przez elektrody typu A (rys. 8a) wystarczające do 30-krotnego rozdrobnienia ziarn w próbce z Al (rys. 6), w próbce z PA2 rozdrobniło ziarno tylko 5-8 razy (rys. 7), przy przepływie prądu w obu próbkach wynoszącym $I = 400$ A.

W badaniach modelowych, gdzie odlewano próbki o znacznie większych objętościach (około 9 razy) niż w badaniach wstępnych, natężenie pola magnetycznego potrzebne do wywołania widocznych zmian strukturalnych okazało się niewystarczające (rys. 9b). Na podstawie badań ustalono, kierując się maksymalnym rozdrobnieniem struktury (rys. 10b i 11a), typ elektrod przedstawiony na rys. 8a i c. Z przeprowadzonych badań wynika, że czas obróbki ciekłego metalu drganiami wytworzonymi przez siły pola magnetycznego nie wpływa zasadniczo na zmiany strukturalne w skali makroskopowej (rys. 10b, 11a). Stwierdzono również, że oddziaływanie na metal zmiennym polem magnetycznym i przepływem prądu jest najefektywniejszą metodą oddziaływania na strukturę metali i stopów w porównaniu z metodami przedstawionymi w literaturze światowej, np. wykorzystujących stałe i wirujące pole magnetyczne oraz metodami przedstawionymi w niniejszej pracy (rys. 11b, 12b).

3. LITERATURA

- [1] Sakwa W., Jura S., Gawroński J., Krajczyk B., Pilarz A., Szajnar J.: Badanie warunków krystalizacji wlewka odlewane go sposobem półciągnym w polu ultradźwiękowym, Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej NB-I-20/20-01-07/78.
- [2] Gawroński J., Szajnar J.: Oddziaływanie drgań ultradźwiękowych i drgań elektromagnetycznych na strukturę odlewu półciągnego z aluminium. Konferencja "Bezwiórowe precyzyjne kształtowanie części maszyn" - materiały konferencyjne. Olsztyn 1979.
- [3] Abramow O.V.: Krystalizacja metali w ultrazwukowym polu. Metalurgia, Moskwa 1972.
- [4] Eskin G.J.: Krystalizacja spawów aluminium z miedzi pod wozdejetwieniem ultrazwukowych kolebanij. Metalłowiedzenie i Termiczeskaja Obrabotka. Metalłow, Nr 4, 1962.
- [5] Dudzikiewicz J.: Podstawy elektromagnetyzmu, Warszawa 1973.

- [6] Ageev A.N.: Ob elektrodinamiczeskim wozbuzhdeni ultrazvuka w zidkikh metallach, Magnitnaja Gidrodinamika, Nr 4, 1974.
- [7] Kirkun J.A., Kuksa J.G., Mikleson A.E.: Ob elektromagnitnom wozbuzhdeni uprugich kolebanij, Magnitnaja Gidrodinamika, Nr 2, 1972.
- [8] Nashimura A., Kawano Y.: Japan Institut Light Metals, nr 6, 1975.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНДУКТИРОВАННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМИ СИЛАМИ
ПРИ ЛИТЬЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Р е з ю м е

В обработке представлены теоретические основы индуктирования колебаний с помощью переменного магнетического поля и токопрохождения через жидкий металл. Проведены предварительные исследования, определяющие пригодность этого метода для повышения качества литейных материалов путем раздробления структуры в процессе затвердевания отливки. Сделан выбор системы электродов воздействующих на затвердевающий металл наиболее эффективно.

THE UTILIZATION OF VIBRATIONS INDUCED BY ELECTRO-DYNAMIC FORCES
IN ALUMINIUM ALLOYS CASTING

S u m m a r y

The paper presents the theoretical basis of vibrations inducing by means of the changing magnetic field and the alternating current flow through the liquid metal. The preliminary tests defining the applicability of the method in heightening the quality of casting materials by means of the refinement of structure in the process of casting solidification have been carried out. The choice of the system of electrodes which displays the best effect on the solidifying metal has been performed.