

Л. П. Пужайло, В. П. Гаврилюк, А. В. Серый,  
С. Л. Поливода, А. Н. Гордыня

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ И ТЕПЛОЙ НАСАДКЕ ПРИ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ СЛИТКОВ

*Проведено моделирование и определены скорости движения жидкого сплава В96Ц при его электромагнитном перемешивании в кристаллизаторе и тепловой насадке машины полунепрерывного литья слитков. Установлена зависимость величины зерна слитков от скорости движения сплава. Определена оптимальная скорость движения жидкого сплава, которая позволяет не только получать максимально измельченную структуру слитков, но и избежать появления дефектов на их поверхности.*

**Ключевые слова:** электромагнитное перемешивание, полунепрерывное литье, алюминиевый сплав.

*Проведено моделювання і визначено швидкості руху рідкого сплаву В96Ц у час його електромагнітного перемішування в кристалізаторі та тепловій насадці машини напівбезперервного лиття зливків. Встановлено залежність величини зерна зливків від швидкості руху сплаву. Визначено оптимальну швидкість руху рідкого сплаву, що дозволяє не лише отримувати максимально здрібнену структуру зливків, але й уникнути появи дефектів на їх поверхні.*

**Ключові слова:** моделювання, електромагнітне перемішування, напівбезперервне лиття, алюмінієвий сплав.

*In the present research was done a simulation and defined the rates of liquid В96Ц alloy motion during its electromagnetic stirring in a crystallizer and hot-top of semicontinuous casting unit. As result it was determined the dependence of ingots grain size on the rate of liquid alloy motion. The optimal rate of liquid alloy motion was defined, which allows to get both the maximal refined structure of ingots and to avoid the appearance of the surface defects of ingots.*

**Keywords:** simulation, electromagnetic stirring, semicontinuous casting, aluminium alloy.

Многочисленными исследованиями [1, 2] установлена прямая зависимость свойств слитков от первичной структуры, полученной в процессе их кристаллизации при непрерывном литье. Наилучшие свойства имеют слитки с мелкозернистой структурой, равномерной по всему сечению слитка. В промышленном производстве слитков из алюминиевых сплавов такая структура достигается путем введения в сплав модификаторов (марганец, хром, скандий, титан, бор, цирконий), а также внешнего силового воздействия (ультразвуковое, электрогидроимпульсное, электромагнитное, вибрационное) на сплав в процессе приготовления и кристаллизации. При этом из всех известных способов силового воздействия электромагнитное перемешивание кристаллизующегося сплава является одним из наиболее эффективных способов получения мелкозернистой структуры.

В настоящее время разработано большое количество разнообразных перемешивателей жидкого металла, при помощи которых создаются различные виды движения жидкого металла в кристаллизаторе: тороидальное [3], вращательное

вокруг вертикальной оси [4], движение жидкого металла в горизонтальной и вертикальной плоскостях одновременно [5]. Однако, несмотря на достаточно широкое практическое применение электромагнитного перемешивания, нет единого мнения о предпочтительном характере движения жидкого металла в кристаллизаторе под действием магнитного поля для эффективного измельчения структуры слитков. Это объясняется использованием в исследованиях различных конструкций кристаллизаторов и перемешивателей, а также разнообразием технологических схем полунепрерывного литья слитков, дающих зачастую противоречивые результаты.

Авторы настоящей работы разработали способ полунепрерывного литья слитков из алюминиевых сплавов с помощью вакуумной МГД-установки и машины полунепрерывного литья с одновременным электромагнитным перемешиванием сплава в кристаллизаторе [6]. При такой технологической схеме процесса литья слитка исследование магнитогидродинамических процессов, вызванных электромагнитным перемешиванием сплава в тепловой насадке и кристаллизаторе, вызывает определенные трудности. Поэтому целью настоящей работы было моделирование этих процессов на олове для выявления магнитогидродинамической структуры движения жидкого металла в кристаллизаторе и тепловой насадке, а также процесса кристаллизации слитка из сплава В96Ц с одновременным электромагнитным перемешиванием для определения его влияния на формирование первичной структуры слитка.

Для проведения исследований разработали и изготовили экспериментальный кристаллизатор с электромагнитным перемешивателем для литья слитков диаметром 90 мм. В основу разработки этого кристаллизатора был положен принцип создания в жидком металле вихревых структур тороидального типа. Экспериментальные исследования магнитогидродинамического движения расплава и определение его скорости выполняли по известной методике [7] с применением трубки Пито (рис. 1). Движение жидкого металла на олове моделировали в тигле 1 с внутренним диаметром 90 мм и высотой 140 мм. Такие же тигли использовали при моделировании процесса кристаллизации сплава В96Ц с одновременным электромагнитным перемешиванием. Для поддержания температуры жидкого олова в пределах 320-330 °С применялась печь 2. Скоростной напор движущегося жидкого олова измеряли кварцевой трубкой 3, погруженной в олово 4, и водяным U-образным манометром 5. Тигель устанавливали в кристаллизатор 6 с электромагнитным перемешивателем 7. Исследование характера движения жидкого олова и определение его скоростного напора проводили в вертикальной и горизонтальной плоскостях. В каждой измеряемой точке трубку устанавливали по отношению к движущемуся потоку таким образом, чтобы получить максимальные показания водяного манометра. При этом прямую трубку применяли при исследовании в вертикальной плоскости, а трубку с загнутым под 90° патрубком – в горизонтальной. Исследования проводили при токовой нагрузке перемешивателя, равной 200 А. Скорость движения жидкого олова определяли по его скоростному напору [7]

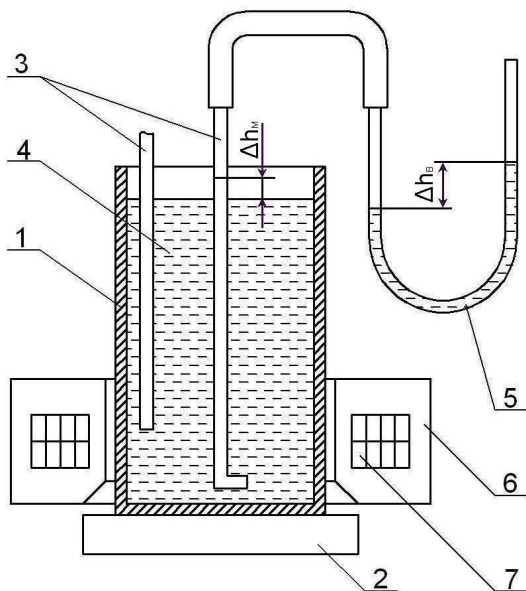
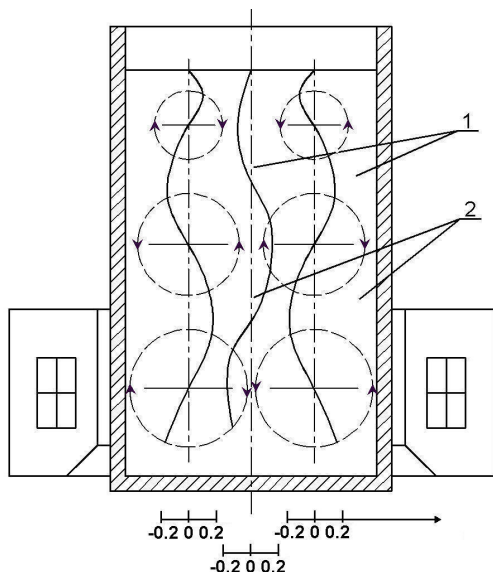


Рис. 1. Схема стенда для определения скорости движения жидкого олова при его электромагнитном перемешивании

$$V = \sqrt{2g \left( \Delta h_M + \frac{\rho_B}{\rho_M} h_B \right)},$$

где  $\rho_B, \rho_M$  – плотность воды и олова соответственно;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\Delta h_B, \Delta h_M$  – высота подъема воды и металла соответственно.



Скорость движения олова в тигле, м/с

Рис. 2. Гидродинамическая картина движения жидкого металла при его электромагнитном перемешивании

Электромагнитное поле перемешивателя при подаче на него напряжения питания создает в жидком олове сложную гидродинамическую картину его движения в тигле (рис. 2). Характер изменения скорости движения жидкого олова по величине и направлению свидетельствует о том, что движущийся металл имеет три основных контура (вихря) магнитогидродинамического тороидального движения. В нижнем вихре скорость движения металла достигает максимальной величины – 0,18 м/с. При этом движение металла в вихре направлено к центру тигля сверху вниз. Скорость движения жидкого металла в среднем вихре меньше (0,13 м/с), а направление его вращения противоположно направлению вращения нижнего вихря. В приповерхностном слое жидкого металла расположен верхний вихрь, где скорость движения металла равна 0,09 м/с, а направление вращения совпадает с направлением

вращения нижнего вихря. Как видно, по мере удаления от электромагнитного перемешивателя скорость движения жидкого металла уменьшается, что связано со снижением напряженности магнитного поля. По мере приближения к центрам вихрей скорость движения металла падает до нуля. При этом у стенок тигля между верхним и средним вихрями, а также между этими вихрями по центру тигля образуются зоны 1 повышенного электромагнитного давления, а между средним и нижним вихрями и стенкой тигля, а также между этими вихрями по центру тигля – зоны 2 пониженного давления. Следует отметить, что на участках изменения направления вращения вихрей по центру тигля наблюдалась нестабильность показаний манометра, что можно объяснить наличием дополнительных мелких вихревых тороидальных структур, находящихся между основными вихрями. Поэтому зависимость изменения скорости движения расплава по центру имеет аппроксимированный вид.

Нижний вихрь, расположенный в зоне фронта кристаллизации, оказывает основное влияние на формирование первичной структуры слитка при его полунепрерывном литье с электромагнитным перемешиванием. Проведенные исследования установили, что скорость движения олова в этом вихре имеет линейную зависимость от параметров питания перемешивателя.

Скорости движения жидкого олова, полученные в результате моделирования на скорость движения жидкого алюминиевого сплава, пересчитывали по методике [8].

Процесс кристаллизации жидкого алюминиевого сплава в кристаллизаторе при непрерывном литье слитка моделировали путем заливки сплава В96Ц, при-

готовленного в печи сопротивления, 1 в тигель 2 (рис. 3) и последующей его кристаллизации с различными режимами электромагнитного перемешивания, которые регулировали изменением параметров питания перемешивателя 3. Осевой теплоотвод от тигля с жидким сплавом осуществляли при помощи медной водоохлаждаемой плиты 4. С целью снижения теплопотерь и создания условий для направленной кристаллизации тигель с жидким сплавом накрывали теплоизолирующим колпаком 5. Для приготовления сплава использовали первичные материалы высокой и технической чистоты: алюминий А99, медь М1, магний Мг96, цинк Ц1, лигатуру Al-5 % Zr. Приготовленный сплав разливали в тигель при температуре 750 °С. Тигель перед заполнением жидким металлом прогревали до температуры 390-400 °С. При моделировании процесса кристаллизации сплав вакуумной обработке не подвергали с целью исключения ее влияния на структуру слитка. Из полученных слитков вырезали продольные и поперечные темплеты для исследования макро- и микроструктуры. Исследование микроструктуры проводили по центру ( $R = 0$ ), на середине радиуса ( $R/2$ ) и периферии ( $R$ ) поперечных темплетов.

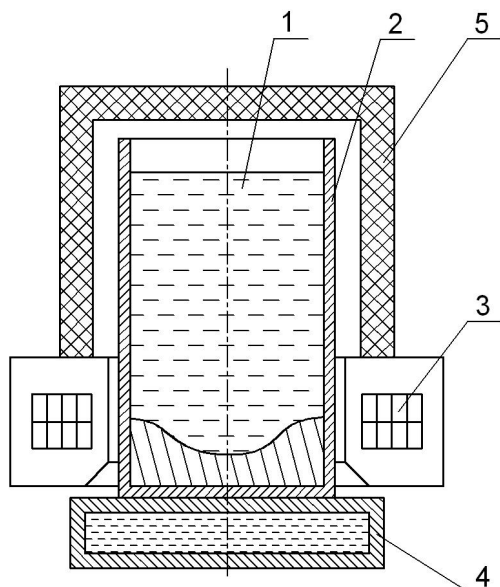


Рис. 3. Схема стенда для моделирования процесса кристаллизации жидкого алюминиевого сплава В96Ц в кристаллизаторе машины полунепрерывного литья слитков при его электромагнитном перемешивании

При кристаллизации слитка без электромагнитного перемешивания образуется разветвленная дендритная структура, особенно четко проявляющаяся в нижней части слитка (рис. 4, а, б), что связано с осевым теплоотводом в тигле. Микроструктура образцов приведена на рис. 5, а.\*

При подаче напряжения питания на электромагнитный перемешиватель и достижении скорости движения расплава в нижнем вихре 0,022 м/с структура слитка изменяется: в нижней части слитка макрозерно измельчается, такая картина наблюдается приблизительно на 1/3 высоты слитка. По мере удаления от электромагнитного перемешивателя макрозерно несколько укрупняется, что связано со снижением скорости движения расплава в этой области. Размер микрозерна в этом случае достигает 420 мкм.

Повышение скорости движения расплава до 0,024 м/с приводит к значительному измельчению макрозерна, особенно в нижней части слитка, приблизительно на половину его высоты (рис. 4, в). Микрозерно, близкое к равноосному (рис. 5, б), имеет четко очерченные границы, по периметру зерна расположена легкоплавкая фаза  $S(\text{Al}_2\text{CuMg})$ . Небольшие включения S-фазы наблюдаются в объеме зерна, что, очевидно, вызвано ее замешиванием в твердый раствор в процессе кристаллизации зерна. Максимальная величина микрозерна в этом случае не превышает 180 мкм (рис. 5, б), причем около 80 % зерен имеют размер не более 120 мкм, то есть структура слитка близка к недендритной.

Дальнейшее повышение скорости движения сплава в нижнем вихре до 0,037 и

\*Исследование микроструктуры проведено на микроанализаторе REMMA-102  
В. Я. Хоружим

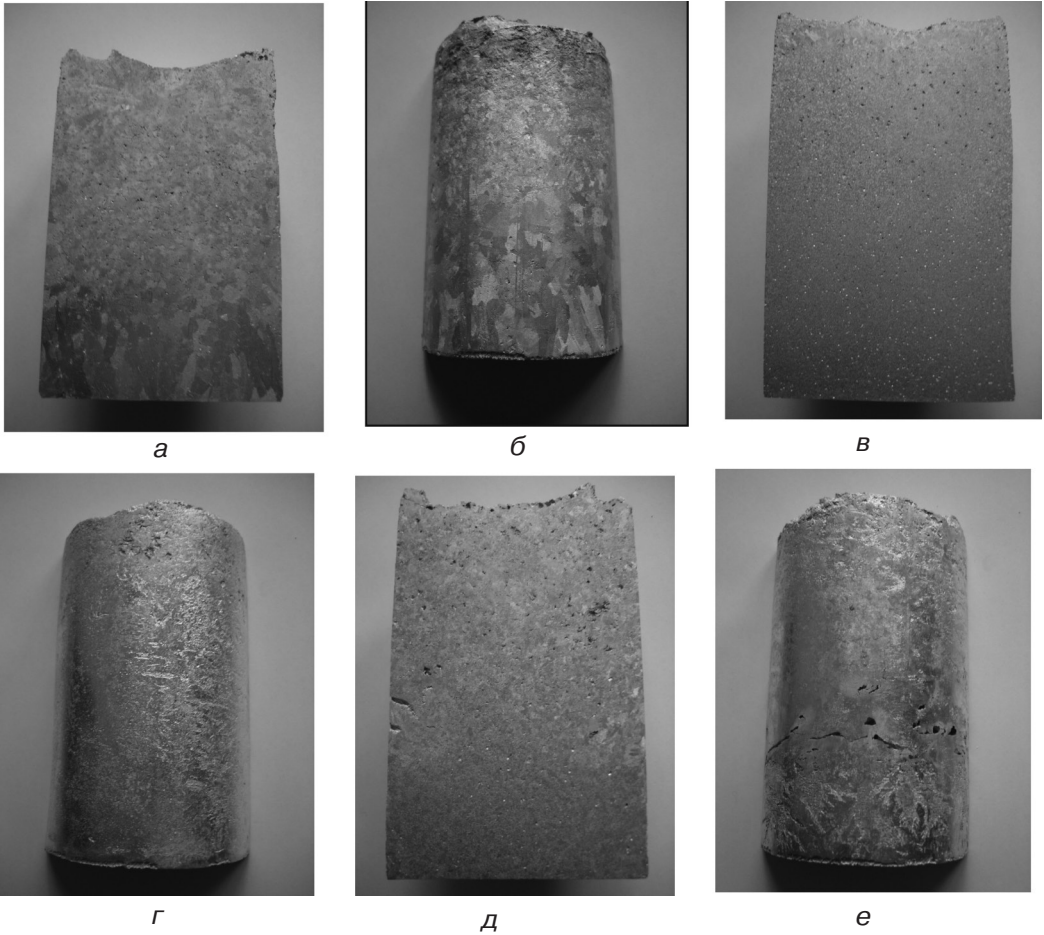


Рис. 4. Макроструктура и поверхность слитков, изготовленных при различных скоростях электромагнитного перемешивания

0,051 м/с приводит к укрупнению микрзерна до 250 мкм, а при 0,083 м/с – до 300 мкм (рис. 5, в), также происходит еще большее запыление S-фазы в твердом растворе.

Зависимость величины зерна слитков диаметром 90 мм из сплава В96Ц, изготовленных с электромагнитным перемешиванием, от скорости движения сплава в нижнем вихре приведена на рис. 6.

Величина скорости движения расплава под действием электромагнитных сил значительно влияет на качество поверхности слитка. Наружная поверхность слитков, закристаллизованных без электромагнитного перемешивания и со скоростями движения сплава до 0,037 м/с (рис. 4, б, г), достаточно ровная и гладкая. Повышение скорости движения расплава до 0,051 м/с приводит к искривлению образующей слитка и появлению на его наружной поверхности дефектов в виде раковин, достигающих в глубину нескольких миллиметров. Этот эффект особенно явно проявляется при дальнейшем повышении скорости движения расплава до 0,083 м/с (рис. 4, д, е). По нашему мнению, это связано с тем, что при движении расплава между нижним и средним вихрями и стенкой тигля образуется зона пониженного давления 2 (см. рис. 2). Разрежение у стенок тигля приводит к искривлению образующей слитка в этой зоне, а при превышении им сил поверхностного натяжения жидкого металла и его гидростатического давления при более высоких скоростях движения расплава – к прорыву поверхностной оксидной пленки и затягиванию ее в расплав. В реальном процессе полунепрерывного литья слитка из сплава В96Ц

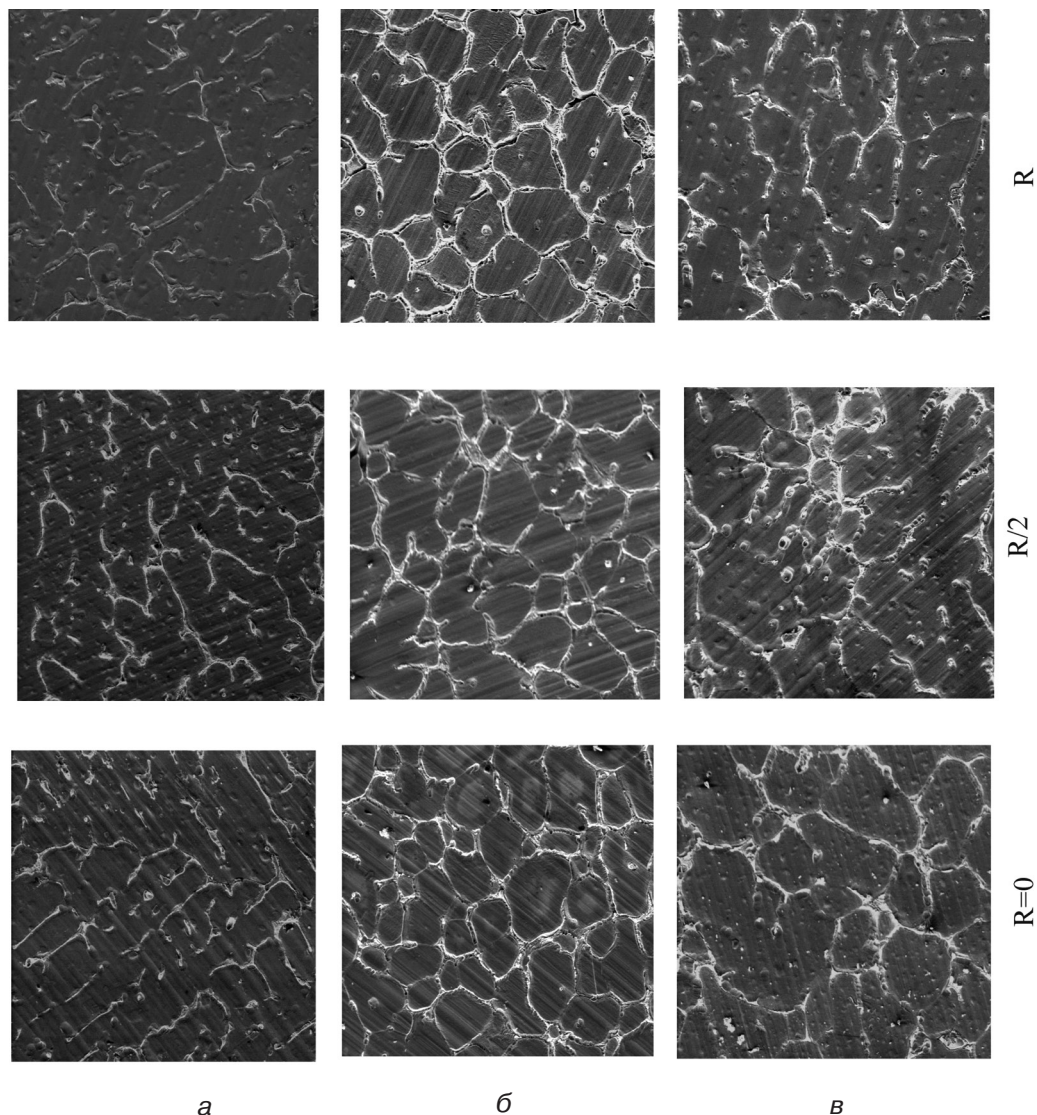


Рис. 5. Микроструктура слитков, изготовленных при различных скоростях электромагнитного перемешивания

с его электромагнитным перемешиванием в кристаллизаторе это явление может привести не только к ухудшению поверхности непрерывнолитого слитка и повышению содержания оксидных включений, но и к прорыву металла и полной остановке процесса литья слитка.

Таким образом, исследованиями по моделированию магнитогидродинамических процессов электромагнитного перемешивания алюминиевого сплава В96Ц в кристаллизаторе и тепловой насадке машины полунепрерывного литья слитков установлено следующее:

- При движении металла в тепловой насадке и кристаллизаторе под действием электромагнитного перемешивания образуются три вихревых тороидальных разнонаправленных по движению структуры. Максимальная скорость движения металла наблюдается в нижней вихревой тороидальной структуре, расположенной в зоне максимальной индукции магнитного поля, создаваемого перемешивателем.

- В объеме перемешиваемого металла возникают зоны повышенного и пониженного давлений. В области примыкания зоны пониженного давления к стенке

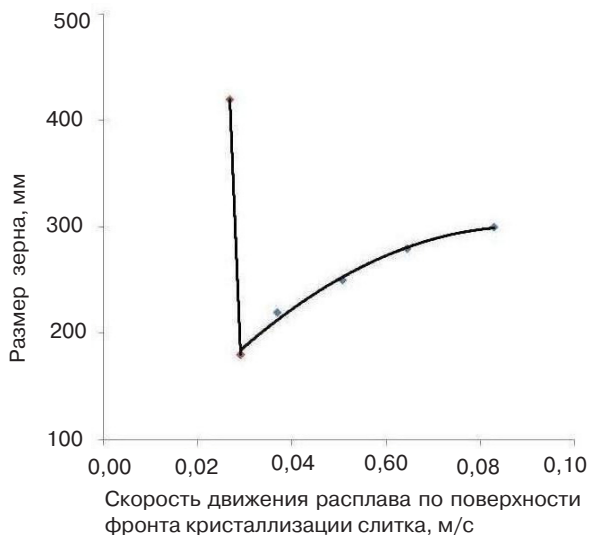


Рис. 6. Зависимость величины зерна слитков из сплава В96Ц, изготовленных с электромагнитным перемешиванием, от скорости движения сплава

кристаллизатора машины полунепрерывного литья слитков при интенсивном электромагнитном перемешивании возможен прорыв образовавшейся на поверхности формирующегося слитка оксидной пленки и затягивание ее внутрь жидкого металла.

- Величина зерна слитка зависит от скорости движения жидкого металла в нижнем вихре. Определена оптимальная скорость (0,024 м/с), при которой движение жидкого металла имеет ламинарный характер,  $Re < 2600$ . Такая скорость позволяет не только максимально измельчить структуру слитка, но и избежать появления дефектов его поверхности. Превышение или занижение этой скорости приводит к огрублению структуры и увеличению размера зерна.

Результаты исследования температурных полей при кристаллизации слитка под действием электромагнитного перемешивания, а также полунепрерывного литья слитков с учетом результатов моделирования будут изложены в следующей статье.



### Список литературы

1. Ливанов В. А., Габидуллин Р. М., Шипилов В. С. Непрерывное литье алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1977. – 168 с.
2. Алюминиевые сплавы. Плавка и литье алюминиевых сплавов: Справочник / М.Б. Альтман, А. Д. Андреев, Н. Н. Белоусов. и др. – М.: Металлургия, 1970. – 416 с.
3. Vives Ch. New Electromagnetic Rheocasters for the Production of Thixotropic Aluminium Alloys Slurries // Magnetohydrodynamics in Process Metallurgy. – 1991. – P. 169-175.
4. Пат. 681142 Швейцария, МПК В 22 Д 11/04. Rohring Adalbert. – Оpubл. 29.01.93.
5. Борисов В. Г. Управление структурой слитков из алюминиевых сплавов в процессе непрерывного литья с МГД-перемешиванием затвердевающего расплава // Цв. металлы. – 2001. – № 9-10. – С. 92-95.
6. Пужайло Л. П., Серый А. В., Поливода С. Л. Полунепрерывное литье слитков из высокопрочных алюминиевых деформируемых сплавов с их электромагнитным перемешиванием в кристаллизаторе // Литейное производство: технологии, материалы, оборудование, экономика и экология: Тез. докл. – Киев: ФТИМС НАНУ, 2011. – С. 228-230.
7. Гориславец Ю. М., Глухенький А. И. Определение скорости вращательного движения жидкого металла в устройстве непрерывного рафинирования // Техническая электродинамика. – 2008. – № 6. – С. 60-64.
8. Тир Л. Л. О моделировании движения жидкого металла в индукционной плавильной печи // Магнитная гидродинамика. – 1965. – № 4. – С. 120-124.

Поступила 06.06.2012