

DOI: [10.7242/1999-6691/2019.12.3.22](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2019.12.3.22)

УДК 539.3

ВЛИЯНИЕ РЕВЕРСНЫХ РЕЖИМОВ МГД-ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА СТРУКТУРУ КРИСТАЛЛИЗУЮЩЕГОСЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

С.А. Денисов¹, В.М. Долгих¹, С.Ю. Хрипченко¹, А.В. Шестаков¹, Р.Р. Сираев²¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

Экспериментально и численно исследовалось влияние реверсных режимов МГД-перемешивания на структуру слитка и гидродинамические процессы при кристаллизации алюминиевого сплава АК7 в цилиндрическом тигле. В результате физических экспериментов выявлено, что с ростом интенсивности вращающегося магнитного поля, вызывающего тороидальное течение металла, уменьшается размер зерна в закристаллизованном слитке. Обнаружена функциональная зависимость с выраженным экстремумом между величиной зерна в структуре слитка и периодом реверсных переключений вращающегося магнитного поля. Добавление бегущего магнитного поля сначала приводит к укрупнению зерна, но с увеличением скорости полоидального течения эффект снижается. Выяснилось, что связь между размером зерна и твердостью слитка слабая. Для определения гидродинамических параметров, влияющих на структуру слитка в реверсном режиме МГД-перемешивания, проведено численное моделирование. Установлено существенное влияние на процессы массопереноса колебаний гидродинамических полей вследствие реверсных переключений. Энергия вертикального течения резко возрастает в интервале периода от 2 до 5 с, но в экспериментально рассмотренном интервале периода реверсных пульсаций вращающегося магнитного поля эта энергия монотонно уменьшается. Плотность кинетической энергии крупномасштабных течений и энергии турбулентных пульсаций с увеличением периода монотонно возрастают.

Ключевые слова: МГД-перемешивание, цилиндрический тигель, бегущее и вращающееся магнитные поля, реверсный режим, кристаллическая структура слитка, численное моделирование

THE EFFECT OF REVERSE MHD STIRRING REGIMES ON THE STRUCTURE OF A CRYSTALLIZING ALUMINUM ALLOY

S.A. Denisov¹, V.M. Dolgikh¹, S.Yu. Khripchenko¹, A.V. Shestakov¹ and R.R. Siraev²¹Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russian Federation²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

The effect of reverse MHD stirring regimes on the ingot structure and the hydrodynamics processes occurred during the crystallization of the aluminum alloy Ak7 in a cylindrical crucible was studied both experimentally and numerically. Physical experiments showed that with increasing intensity of the rotating magnetic field generating the toroidal flow of the metal the size of grains in the crystallized ingot decreases. The functional relation exhibiting a pronounced extremum between the grain size in the ingot structure and the reverse period of the rotating magnetic field was determined. Addition of the poloidal flow first causes the grain size to increase, but then this effect decreases because of the increased velocity of the poloidal flow. It was found that the relation between the grain size and the ingot hardness is rather weak. Hydrodynamic parameters that influence the ingot structure in the reverse MHD stirring regime were determined through numerical simulations. Analysis of the results indicates that the reversals have a strong effect on heat and mass transfer processes. In the range of 2 to 5 C, the energy of the vertical flow increases sharply, whereas in the experimentally studied period of reverse pulsations of the rotating magnetic field it decreases in monotone way. As this period increases, the kinetic energy of large-scale flows and the energy of turbulent pulsations increase monotonically.

Key words: MHD stirring, cylindrical crucible, travelling and rotating magnetic field, reverse regime, ingot crystalline structure, numerical modeling

1. Введение

Управление структурой и свойствами алюминиевых сплавов при помощи регулируемого воздействия на них в момент кристаллизации вращающимися и бегущим магнитными полями является современной технологией мирового уровня [1, 2]. При производстве круглых непрерывных слитков из алюминиевых сплавов с помощью МГД-перемешивания можно существенно менять структуру кристаллизующегося сплава и получать материалы с улучшенными техническими характеристиками. На практике наиболее часто применяется вращающееся магнитное поле (RMF); оно генерирует азимутальное вращение, которое ведет к измельчению дендритов и к уменьшению размеров зерна в кристаллической структуре слитка. Дополнительно может использоваться бегущее магнитное поле (TMF); это поле порождает вертикальное (полоидальное) течение, усиливает тепломассоперенос, сказывается на форме фронта кристаллизации. В большинстве известных из литературы работ рассматривается воздействие на кристаллизующийся в цилиндрическом объеме жидкий металл непрерывно действующих RMF и TMF [3,4]. Также проявляется интерес к импульсному и реверсному режимам МГД-перемешивания, когда вращающееся магнитное поле

воздействует на жидкий металл либо в прерывистом режиме, либо периодически меняет направление вращения [5–10]. В работах [7, 8] показано, что импульсное или реверсное включение вращающегося магнитного поля при МГД–перемешивании металла в цилиндрическом объёме при определённых режимах способно усилить процессы тепломассопереноса за счёт усиления вторичного вертикального течения в жидком металле, а при кристаллизации сплава (помимо измельчения зерна) уменьшить явление сегрегации.

Целью настоящей работы было исследование влияния реверсного режима вращающегося магнитного поля при МГД–перемешивании расплава на структуру получаемого слитка и на процессы тепломассопереноса в ходе направленной кристаллизации алюминиевого сплава.

2. Физический эксперимент

Проводилась направленная кристаллизация алюминиевого сплава АК7 в цилиндрическом тигле при различной интенсивности вращающегося магнитного поля, работающего в реверсном режиме. Одновременно с вращающимся полем на расплав воздействовало бегущее вниз магнитное поле.

В процессе эксперимента в графитовом тигле печи сопротивления расплавлялось 3,5–3,8 кг сплава (93% Al, 7% Si), его температура доводилась до 807–817°C, после чего сплав вынимался из печи и заливался в тигель из нержавеющей стали, защищенный внутри специальной обмазкой. Этот тигель имел водоохлаждаемое дно и был установлен в рабочем объёме перемешивателя, в котором уже действовали бегущее и вращающееся магнитные поля. Для предотвращения ухода тепла через боковые стенки тигель был окружён кольцевым нагревателем мощностью 600–650 Вт. После заливки сплава включалось водяное охлаждение дна тигля и тигель закрывался теплоизолированной крышкой. Таким образом, в тигле осуществлялась направленная кристаллизация сплава при выбранном режиме МГД–перемешивания.

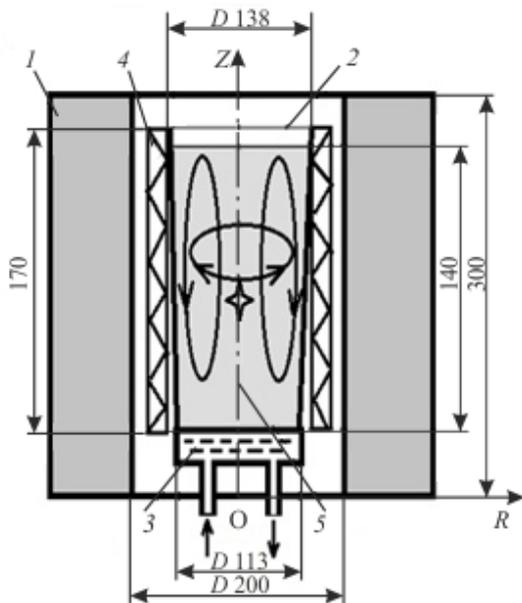


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – МГД–перемешиватель, 2 – тигель из нержавеющей стали с защитной обмазкой, 3 – водоохлаждаемое дно (снизу стрелками показано движение воды), 4 – кольцевой нагреватель, 5 – жидкий металл в тигле, 6 – положение площадки в 1 мм², на которой определялись твёрдость слитка и количество зёрен

На рисунке 1 показана схема экспериментальной установки. МГД–перемешиватель имел рабочий объём диаметром 200 мм и высотой 300 мм, был снабжён двумя индукторами, которые питались регулируемым трёхфазным током промышленной частоты (50 Гц) и создавали в рабочем объёме бегущее и вращающееся магнитные поля. Источник электропитания индукторов мог поддерживать непрерывный режим работы бегущего магнитного поля заданной величины, а также реверсный режим работы вращающегося магнитного поля различной амплитуды и периода переключения.

После кристаллизации слитки, подвергнутые МГД–воздействию, разрезали по центру вдоль

оси Z. Поверхность разреза шлифовалась, травилась смесью азотной, плавиковой и соляной кислот. Полученная картина структуры слитка фотографировалась с помощью цифрового микроскопа (Nіgox КН-7700). По фотографиям подсчитывалось количество зёрен на 1 мм², и стандартным способом измерялась твёрдость по Бринеллю в центральной части слитков, полученных при различных режимах МГД–перемешивания. На рисунке 1 показано место фотографирования структуры слитка и измерения его твёрдости после кристаллизации, стрелками обозначено направление движения сплава при его перемешивании.

На рисунке 2 представлено распределение радиальной компоненты индукции B_r магнитного поля в рабочем объёме МГД–перемешивателя, которое определялось при помощи измерителя магнитного поля LakeShore 421-MNT-4E04-VH.

Рисунок 3 содержит фотографии кристаллической структуры слитка для случая непрерывно действующего RMF. На рисунке 4 приводятся графики зависимости количества зёрен на 1 мм² от индукции непрерывно действующего RMF для трёх значений B_{TMF} — индукции бегущего магнитного поля. Из графиков видно, что с ростом индукции RMF размер зерна уменьшается. В то же время

добавление воздействия бегущим магнитным полем сначала вызывает увеличение размера зерна, но с наращиванием интенсивности ТМФ влияние RMF исчезает. Эти графики соответствуют концепции, согласно которой перемешивание в горизонтальной плоскости, осуществляемое вращающимся магнитным полем, измельчает образующиеся дендритные структуры, не давая им разрастаться, уменьшает и «окатывает» зерно.

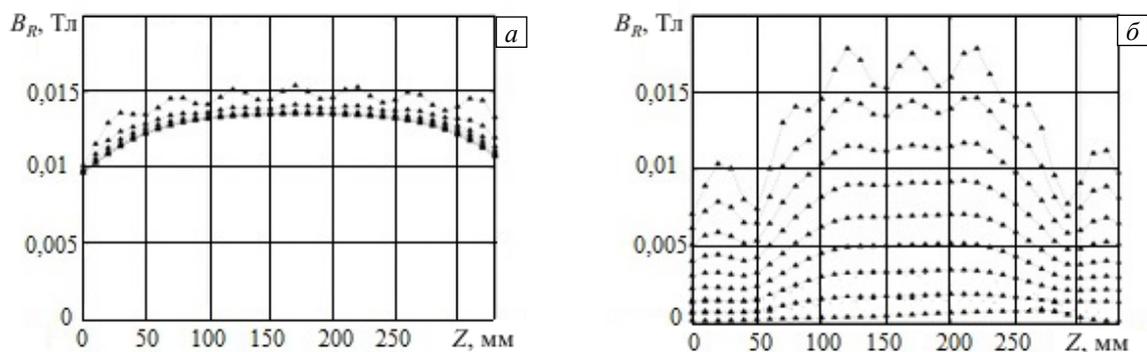


Рис. 2. Распределение радиальной компоненты индукции вращающегося – $B_{RMФ}$ (а), и бегущего – $B_{ТМФ}$ (б), магнитных полей по высоте тигля при токе в индукторах МГД-перемешивателя, равном 12,8 А; верхние кривые для обоих полей относятся к измерениям у боковой стенки рабочего объёма перемешивателя, проведённым на расстоянии 10 мм (а) и 16 мм (б) с шагом 10 мм от боковой стенки; кривые, лежащие под ними, соответствуют более близким к оси перемешивателя расстояниям; шаг в радиальном направлении составлял 33 мм (а) и 10 мм (б); самые нижние кривые отвечают измерениям на оси перемешивателя

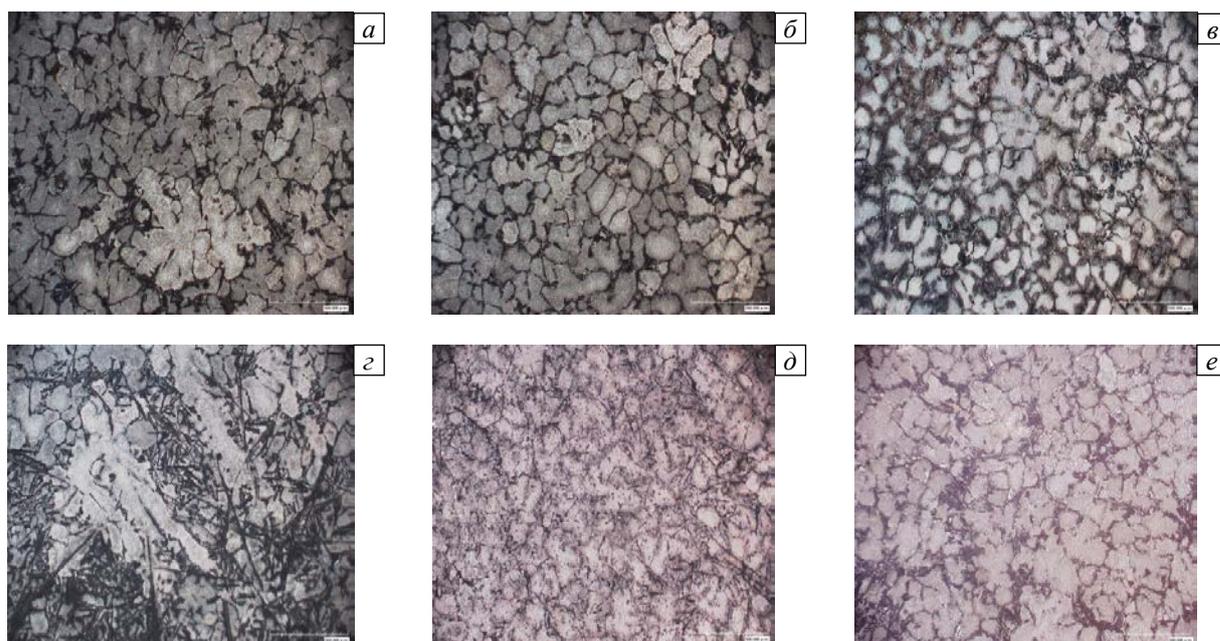


Рис. 3. Структура слитка при различных значениях вращающегося и бегущего магнитных полей, мТ: $B_{RMФ} = 4,04$ (а), $6,06$ (б), $8,08$ (в) при $B_{ТМФ} = 0$; $B_{RMФ} = 4,04$ (г), $6,06$ (д), $8,08$ (е) при $B_{ТМФ} = 4,32$

Результаты для реверсного режима RMF представлены на рисунках 5–7. На рисунках 5, 6 приводятся графики зависимости количества зёрен, приходящихся на 1 мм^2 , от периода переключения вращающегося магнитного поля T_p для трёх значений $B_{RMФ}$ в отсутствие бегущего поля (Рис. 5) и при его наличии (Рис. 6). Из рисунков видно, что влияние бегущего поля при реверсном режиме работы вращающегося магнитного поля на величину зерна имеет более сложный характер, чем в случае, когда вращающееся поле работает непрерывно. Главной особенностью этих графиков является наличие выраженных экстремумов. В отсутствие бегущего поля экстремумы приходятся на значение периода 24 с. При наличии бегущего поля положение экстремумов смещается в область меньших значений периода (Рис. 6).

На рисунке 7 показана структура центра слитка, полученная при различных значениях бегущего и вращающегося магнитных полей, работающих в реверсном режиме.

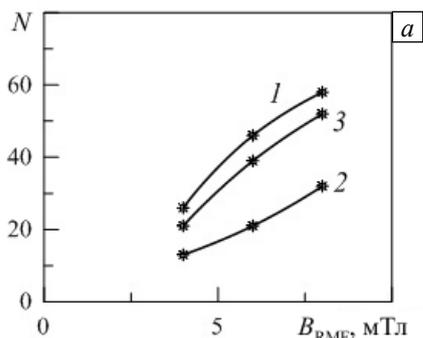


Рис. 4. Число зёрен N на 1 мм^2 в центре слитка в зависимости от индукции вращающегося магнитного поля B_{RMF} (в непрерывном режиме) при значениях B_{TMF} , мТ: 0 (кривая 1); 4,32 (2); 8,64 (3)

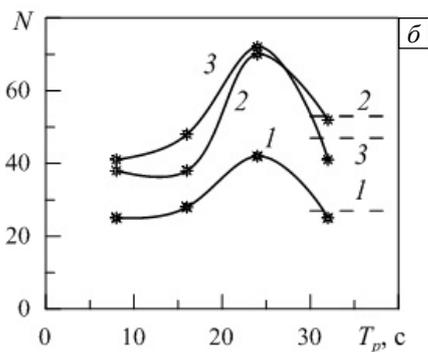


Рис. 5. Число зёрен N на 1 мм^2 в центре слитка в отсутствие бегущего поля в зависимости от периода реверсных переключений RMF при B_{RMF} , мТ: 4,04 (кривая 1); 6,06 (2); 8,08 (3); пунктирные линии – значения N при $T_p = \infty$

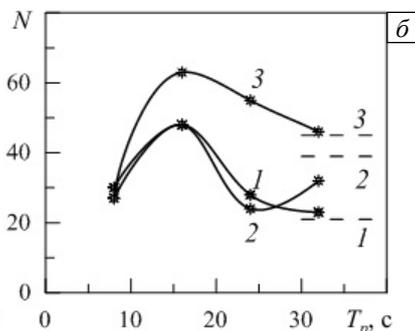
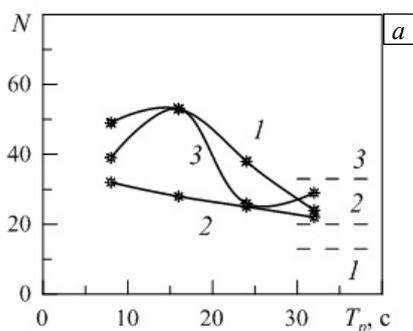


Рис. 6. Число зёрен N на 1 мм^2 в центре слитка при наличии бегущего магнитного поля B_{TMF} , мТ: 4,32 (а); 8,64 (б), в зависимости от периода переключений вращающегося магнитного поля при значениях индукции B_{RMF} , мТ: 4,04 (кривые 1); 6,06 (2); 8,08 (3); пунктирными линиями обозначены значения N при $T_p = \infty$

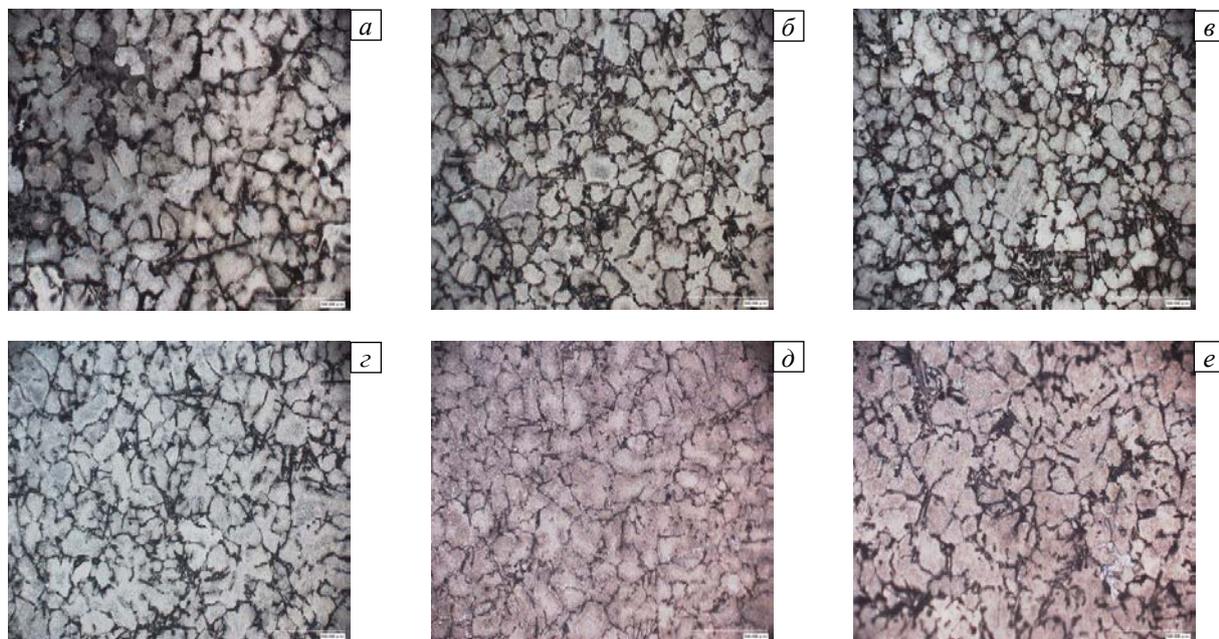


Рис. 7. Структура слитка при реверсном режиме вращающегося магнитного поля ($T_p = 24$) и различных значениях индукции бегущего магнитного поля, мТ: $B_{RMF} = 4,04$ (а), 6,06 (б), 8,08 (в) при $B_{TMF} = 0$; $B_{RMF} = 4,04$ (г), 6,06 (д), 8,08 (е) при $B_{TMF} = 4,32$

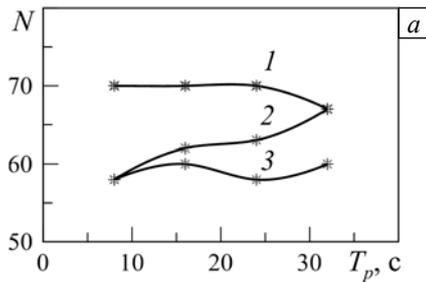


Рис. 8. Твёрдость сплава по Бринеллю в центре слитка в зависимости от периода реверсной пульсации вращающегося магнитного поля при $B_{RMF} = 4,04$ мТ и разных значениях B_{TMF} : 0 (кривая 1); 4,32 (2); 8,64 (3)

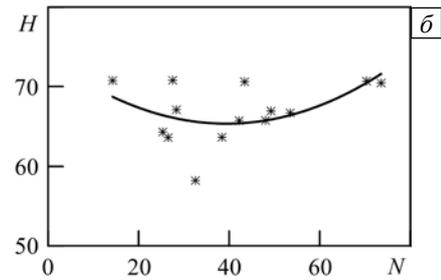


Рис. 9. Твёрдость сплава по Бринеллю в центре слитка в зависимости от количества зёрен на 1 мм²

В эксперименте определялась твёрдость по Бринеллю в том месте слитка, где рассматривалась его структура. Зависимость твёрдости от периода переключения вращающегося магнитного поля приведена на рисунке 8. На рисунке 9 представлена твёрдость в центре слитка как функция количества зёрен на 1 мм². Видно, что в обоих случаях связь слабо выражена.

3. Численный эксперимент

Задачей теоретической части исследования являлось изучение влияния реверсного режима включения вращающегося магнитного поля в отсутствие или при наличии бегущего магнитного поля на перемешивание жидкого металла в тигле с круглым поперечным сечением (схему конструкции см. на Рис. 1) и режимов работы МГД-перемешивателя, применяемого в эксперименте. Время, в течение которого рассчитывалась эволюция течения, равнялось нескольким периодам реверсного переключения RMF, но при этом оно было много меньшим по сравнению с характерным временем движения фронта кристаллизации. Вследствие этого процесс продвижения фронта кристаллизации не рассматривался, нижняя твёрдая граница расчётной области считалась неподвижной и плоской.

Важным упрощающим математическую модель обстоятельством служит то, что скорости течения расплавленного металла в перемешивателе малы по сравнению со скоростями вращающегося и бегущего магнитных полей, а электропроводность расплава умеренная. Поэтому процесс переноса магнитного поля посредством движущейся проводящей среды пренебрежимо слаб. В связи с этим задача нахождения электромагнитных сил решалась в низкочастотном приближении без учета движения проводящей среды и отдельно от задачи определения гидродинамических полей в перемешиваемом объёме.

Для вычисления поля электромагнитных сил применялся пакет ANSYS MAXWELL 3D. Создавалась точная геометрическая модель МГД-перемешивателя и тигля, участвовавших в эксперименте. Расчётная область содержала МГД-перемешиватель, тигель с расплавленным металлом и окружающую их дополнительную протяжённую область, заполненную воздухом. Все материалы, кроме стального сердечника, не ферромагнитные ($\mu = 1$), магнитная проницаемость сердечника считалась постоянной: $\mu = 2500$. На наружной границе расчётной области выполнялось равенство нулю нормальной компоненты векторного потенциала. К физическим параметрам, обуславливающим величину электромагнитного поля и не связанным с геометрией, относились токи в индукторах, частота тока, число витков в катушках. Их значения совпадали с значениями аналогичных величин, имевших место в эксперименте. В результате решения находилось поле лоренцевых сил в жидком металле, которое передавалось в программу решения гидродинамической задачи.

Трёхмерная краевая задача течения жидкости решалась в рамках $k-\varepsilon$ модели турбулентности с использованием пакета ANSYS CFX. Граничные условия предполагали прилипание и непроницаемость жидкости на нижней и боковых твёрдых гранях тигля, непроницаемость и проскальзывание на верхней твёрдой грани. Таким образом, верхняя грань рассматривалась как условно свободная поверхность жидкости, так как изменение её формы вследствие движения жидкости не учитывалось. Расчётная сетка сгущалась вблизи стенок, где в соответствии со скин-эффектом преимущественно сосредоточено поле лоренцевых сил, и содержала не менее 10^5 узлов.

На рисунке 10 приводятся зависимости средних по времени удельной кинетической энергии крупномасштабного движения — W_k , и удельной энергии турбулентных пульсаций — W_{turb} , жидкого металла от периода переключения RMF. Из рисунка видно, что W_k и W_{turb} растут с увеличением периода реверсного движения и с ростом индукции вращающегося магнитного поля. В то же время эти величины мало зависят от индукции бегущего магнитного поля. Средняя по времени удельная кинетическая энергия

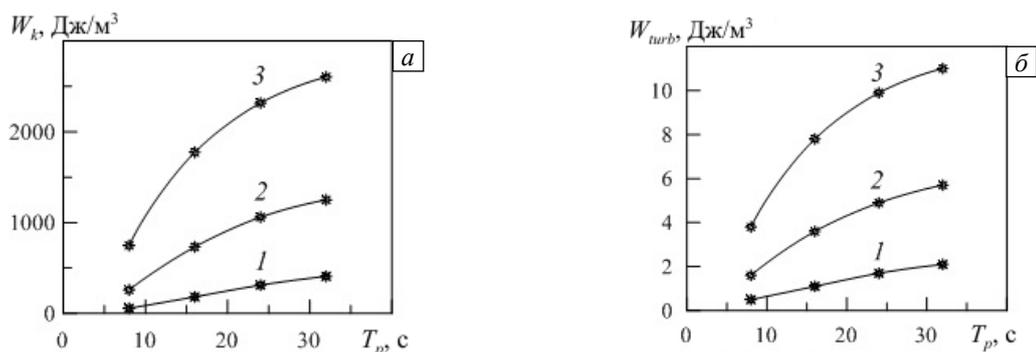


Рис. 10. Осредненные по периоду удельная кинетическая энергия крупномасштабных течений (а) и удельная энергия турбулентных пульсаций (б) в зависимости от периода переключения RMF при различных значениях B_{RMF} , мТ: 4,04 (кривые 1); 6,06 (2); 8,08 (3) в присутствии бегущего магнитного поля с $B_{TMF} = 0$ мТ; включение $B_{TMF} = 4,32$ мТ на характере зависимости практически не сказывается

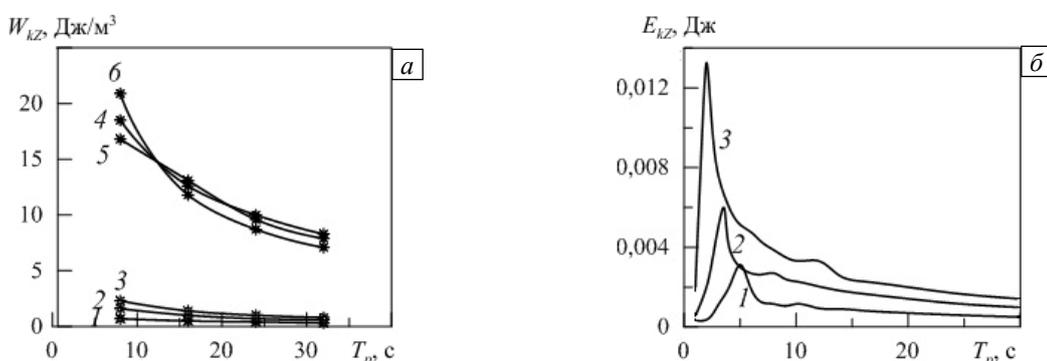


Рис. 11. Осредненная по времени удельная кинетическая энергия вертикального течения в зависимости от периода переключения RMF при действии бегущего магнитного поля $B_{TMF} = 0$ мТ (кривые 1–3) и $B_{TMF} = 4,32$ мТ (кривые 4–6) при различных значениях B_{RMF} , мТ: 4,04 (кривые 1, 4); 6,06 (2, 5); 8,08 (3, 6)

Рис. 12. Осредненная по времени кинетическая энергия вертикального течения во всём объёме в зависимости от периода реверсных пульсаций для значений B_{RMF} , мТ: 8,08 (кривая 1); 6,06 (2); 4,04 (3) при отсутствии бегущего магнитного поля

крупномасштабного вертикального течения — W_{kz} , ведет себя иначе. Она уменьшается с ростом величины периода реверсных пульсаций вращающегося магнитного поля и увеличивается с ростом RMF (Рис. 11). При включении постоянно действующего бегущего магнитного поля кинетическая энергия вертикального течения возрастает.

На рисунке 12 средняя по времени кинетическая энергия вертикального течения во всём объёме — E_{kz} , представлена в зависимости от периода реверсного переключения RMF. Можно видеть, что интенсивность вертикального течения имеет ярко выраженный максимум в интервале T_p от 2 до 5 с. Период, при котором наблюдается максимум, уменьшается с возрастанием интенсивности тороидального течения металла в тигле.

Усиление полоидального течения в объёме вращающейся жидкости в результате реверсных переключений RMF является важной особенностью рассматриваемой задачи. Данное течение при реверсных переключениях RMF испытывает колебания, что оказывает сильное влияние на процессы теплообмена, вызывает интенсивные пульсации гидродинамических и термодинамических полей. Такие колебания вблизи фронта кристаллизации должны сказываться и на процессе кристаллизации, и, возможно, на качестве структуры слитка.

4. Заключение

Экспериментально изучена роль различных режимов реверсного МГД-перемешивания сплава АК7 при его направленной кристаллизации в формировании величины зерна в кристаллической структуре получаемого слитка. Обнаружена немонотонная зависимость параметров структуры от периода переключения реверсного тороидального перемешивания. При некотором значении периода обеспечивается структура полученного сплава с наименьшим размером зерна. Измельчение зерна в основном происходит под действием тороидального течения, вызванного RMF, в то время как

иницируемое ТМФ полоидальное течение влияет на величину зерна неоднозначно. При наличии такого течения зерно сначала укрупняется, но с увеличением скорости течения этот эффект снижается.

В результате численного моделирования изучено воздействие реверсного режима включения вращающегося магнитного поля на перемешивание жидкого металла. Выяснилось, что в экспериментально рассмотренном интервале периода реверсных пульсаций вращающегося магнитного поля интегральные характеристики гидродинамических полей, такие как плотность кинетической энергии крупномасштабного течения, энергии турбулентных пульсаций, кинетической энергии вертикального движения, зависят от периода монотонным образом. Аналогичный результат получен для локальных гидродинамических характеристик, например, скорости в пограничном слое вблизи нижней границы области. Таким образом, при численном исследовании не обнаружено данных, коррелирующих с выявленным в эксперименте эффектом немонотонной зависимости параметров структуры слитка от периода переключения реверсного перемешивания. В то же время можно говорить о существенном влиянии на процессы тепломассопереноса колебаний гидродинамических полей, возбуждаемых при реверсных переключениях RMF. Колебания температуры вблизи фронта кристаллизации могут существенно сказываться на процессе кристаллизации и, возможно, на качестве структуры слитка. Данный вопрос требует дополнительного изучения.

Метод электромагнитного перемешивания, в котором используется модулированный RMF, обладает значительным потенциалом для повышения эффективности перемешивания и оптимизации свойств слитков.

Исследование выполнено в рамках проекта № 18-10-1-9 государственной программы УрО РАН 2018–2020 г. (Новые материалы и технологии). Работа поддержана грантом Министерства науки и образования РФ (№ 3.6990.2017/8.9).

Литература

1. Великий А.Б., Казаков А.С., Филиппова В.П., Алексеев А.Г. Влияние электромагнитного перемешивания на структуру и химическую неоднородность сортовой непрерывнолитой заготовки // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2007. № 4. С. 37-40.
2. Борисов В.Г. Технология производства фасонных изделий из алюминиевых сплавов методом тиксоформовки. Проблемы и решения // Технология легких сплавов. 2016. № 2. С. 71-79.
3. Хрипченко С.Ю., Никулин Л.В., Долгих В.М., Денисов С.А. Структура и свойства полученных с применением магнитогидродинамического воздействия заготовительных слитков из алюминивно-кремниевого сплава // Цветные металлы. 2014. № 6. С. 82-86.
4. Denisov S., Dolgikh V., Khripchenko S., Kolesnichenko I., Nikulin L. The effect of traveling and rotating magnetic fields on the structure of aluminum alloy during its crystallization in a cylindrical crucible // *Magnetohydrodynamics*. 2014. Vol. 50. P. 407-422. <https://doi.org/10.22364/mhd.50.4.8>
5. Dardik I., Kapusta A., Mikhailovich B., Golbraikh E., Lesin S., Branover H. US Patent No. WO/2004/058433 16 December 2002.
6. Branover H., Golbraikh E., Kapusta A., Mikhailovich B., Dardik I., Thompson R., Lesin S., Khavkin M. On the potentialities of intensification of electromagnetic stirring of melts // *Magnetohydrodynamics*. 2006. Vol. 42. No. 2/3. P. 291-298.
7. Eckert S., Nikrityuk P.A., Rübiger D., Eckert K., Gerbeth G. Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part I. Flow field in a liquid metal column // *Metall. and Materi. Trans. B*. 2007. Vol. 38. P. 977-988. <https://doi.org/10.1007/s11663-007-9096-4>
8. Willers B., Eckert S., Nikrityuk P.A., Rübiger D., Dong J., Eckert K., Gerbeth G. Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part II. Application to solidification of Al-Si alloys // *Metall. and Materi. Trans. B*. 2008. Vol. 39. P. 304-316. <https://doi.org/10.1007/s11663-008-9126-x>
9. Rübiger D., Eckert S., Gerbeth G., Franke S., Czarske J. Flow structures arising from melt stirring by means of modulated rotating magnetic fields // *Magnetohydrodynamics*. 2012. Vol. 48. No. 1. P. 213-220.
10. Eckert S., Nikrityuk P.A., Willers B., Rübiger D., Shevchenko N., Neumann-Heyme H., Travnikov V., Odenbach S., Voigt A., Eckert K. Electromagnetic melt flow control during solidification of metallic alloys // *Eur. Phys. J. Spec. Top*. 2013. Vol. 220. P. 123-137. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2013-01802-7>

References

1. Velikiy A.B., Kazakov A.S., Filippova V.P., Alekseyev A.G. Vliyaniye elektromagnitnogo peremeshvaniya na strukturu i khimicheskuyu neodnorodnost' sortovoy nepreryvnolitoi zagotovki [The influence of electromagnetic mixing on the structure and chemical heterogeneity of high-grade continuous-cast billet]. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova – Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2007, no. 4, pp. 37-40.
2. Borisov V.G. A technology for production of shaped aluminium alloy components via the thixofforming technique. Problems and solutions. *Tekhnologiya legkikh splavov – Technology of Light Alloys*, 2016, no. 2, pp. 71-79.
3. Khripchenko S. Yu., Nikulin L.V., Dolgikh V.M., Denisov S.A. Structure and properties of aluminum-silicon alloy ingots, obtained by magnetic-dynamic influence. *Tsvetnyye metally – Nonferrous Materials*, 2014, no. 6, pp. 82-86.
4. Denisov S., Dolgikh V., Khripchenko S., Kolesnichenko I., Nikulin L. The effect of traveling and rotating magnetic fields on the structure of aluminum alloy during its crystallization in a cylindrical crucible. *Magnetohydrodynamics*, 2014, vol. 50, pp. 407-422. <https://doi.org/10.22364/mhd.50.4.8>

5. Dardik I., Kapusta A., Mikhailovich B., Golbraikh E., Lesin S., Branover H. US Patent No. WO/2004/058433 16 December 2002.
6. Branover H., Golbraikh E., Kapusta A., Mikhailovich B., Dardik I., Thompson R., Lesin S., Khavkin M. On the potentialities of intensification of electromagnetic stirring of melts. *Magnetohydrodynamics*, 2006, vol. 42, no. 2/3, pp. 291-298.
7. Eckert S., Nikrityuk P.A., Rübiger D., Eckert K., Gerbeth G. Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part I. Flow field in a liquid metal column. *Metall. and Materi. Trans. B*, 2007, vol. 38, pp. 977-988. <https://doi.org/10.1007/s11663-007-9096-4>
8. Willers B., Eckert S., Nikrityuk P.A., Rübiger D., Dong J., Eckert K., Gerbeth G. Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part II. Application to solidification of Al-Si alloys. *Metall. and Materi. Trans. B*, 2008, vol. 39, pp. 304-316. <https://doi.org/10.1007/s11663-008-9126-x>
9. Rübiger D., Eckert S., Gerbeth G., Franke S., Czarske J. Flow structures arising from melt stirring by means of modulated rotating magnetic fields. *Magnetohydrodynamics*, 2012, vol. 48, no. 1, pp. 213-220.
10. Eckert S., Nikrityuk P.A., Willers B., Rübiger D., Shevchenko N., Neumann-Heyme H., Travnikov V., Odenbach S., Voigt A., Eckert K. Electromagnetic melt flow control during solidification of metallic alloys. *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, 2013, vol. 220, pp. 123-137. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2013-01802-7>

Поступила в редакцию 02.04.2019; после доработки 15.05.2019; принята к опубликованию 21.06.2019

Сведения об авторах

Денисов Сергей Анатольевич, снс, Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614018, г. Пермь, ул. Академика Королёва, д. 1; e-mail: denisov@icmm.ru; ORCID: 0000-0003-2429-3269

Долгих Вениамин Михайлович, снс, ИМСС УрО РАН; e-mail: dolgikh@icmm.ru, ORCID: 0000-0003-2130-0718

Хрипченко Станислав Юрьевич, внс, ИМСС УрО РАН; e-mail: khripch@icmm.ru, ORCID: 0000-0003-0387-5630

Шестаков Александр Владимирович, нс, ИМСС УрО РАН; e-mail: Shestakov@icmm.ru, ORCID: 0000-0001-5347-5120

Сираев Рамиль Рифатович, кфмн, доц., Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29; e-mail: r.r.siraev@pstu.ru, ORCID: 0000-0002-0756-4795