

СКОРОСТЬ ПРОДВИЖЕНИЯ ФРОНТА НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АЛЮМИНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ТИГЛЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ МГД-ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

С.Ю. Хрипченко, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

В.М. Долгих, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Для цитирования:

Хрипченко С.Ю., Долгих В.М. Скорость продвижения фронта направленной кристаллизации алюминия в цилиндрическом тигле при различных режимах МГД-перемешивания // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2022. – № 3. – С. 7–13. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2022.3.1>

Для повышения качества непрерывных цилиндрических слитков из алюминия и его сплавов в машинах непрерывного литья в процессе их работы применяется МГД-перемешивание в теплом верхе кристаллизатора. В жидком металле в этом случае возбуждаются полоидальное и тороидальное течения. Эти течения существенно влияют на перенос тепла от поступающего в теплый верх кристаллизатора горячего металла к зоне охлаждения, где формируется фронт кристаллизации.

Эксперимент показал, что тороидальное течение сначала снижает скорость продвижения фронта кристаллизации, затем с усилением величины вращающегося поля (усиление тороидального течения) скорость перестает заметно меняться. Полоидальное течение (бегущее магнитное поле) также сначала снижает скорость фронта, но несколько быстрее, чем тороидальное, и на кривой зависимости скорости продвижения фронта от величины бегущего поля есть минимум, после которого скорость продвижения фронта кристаллизации начинает расти. Было обнаружено, что при совместном действии бегущего и вращающегося магнитных полей скорость продвижения фронта кристаллизации сначала снижается, затем возрастает.

Ключевые слова: бегущее магнитное поле, вращающееся магнитное поле, скорость продвижения фронта кристаллизации, жидкий алюминий, МГД-перемешивание, тороидальное и полоидальное течение, эксперимент.

Введение

В цветной металлургии получило широкое распространение литье цилиндри-

ческих слитков из алюминиевых сплавов при помощи машин непрерывного литья. Для повышения качества получаемых

* Исследование выполнено в соответствии с госбюджетным планом АААА-А19-119012290101-5 ИМСС (раздел1,2), а также при поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-48-590001 р_а (раздел3,4).

слитков в этих машинах в процессе литья применяется МГД-перемешивание в теплом верхе кристаллизатора [1–4]. В жидком металле в этом случае возбуждаются полоидальное, и тороидальное течения. При МГД-перемешивании в процессе кристаллизации происходит измельчение зерна в кристаллической структуре слитка, что обеспечивает повышение его механических характеристик [5–7].

Кроме этого, МГД-перемешивание можно применять в некоторых технологиях получения алюмокомпозитных материалов для лучшего распределения вводимых армирующих частиц в объеме металла [8–10].

Полоидальное и тороидальное течения существенно влияют на перенос тепла от поступающего в теплый верх кристаллизатора горячего металла к зоне охлаждения, где формируется фронт кристаллизации. Таким образом, полоидальное и тороидальное течения металла в теплом верхе кристаллизатора существенно влияют на форму и скорость движения фронта кристаллизации. От скорости продвижения фронта кристаллизации зависит скорость вытягивания слитка из кристаллизатора, а следовательно, и производительность процесса.

В работе экспериментально исследовался процесс продвижения фронта направленной кристаллизации жидкого алюминия в цилиндрическом тигле при различных режимах МГД-перемешивания.

Экспериментальная установка и порядок проведения эксперимента

Экспериментальная установка (рис. 1) представляла собой МГД-перемешиватель 1, который создавал раздельно регулируемые бегущее (волновое число $20,9 \text{ м}^{-1}$, частота 50 Гц) и вращающееся магнитные поля (двухполюсный индуктор 50 Гц). Тигель 2 с круглым поперечным сечением и водоохлаждаемым дном 3 находился в рабочем объеме МГД-перемешивателя. Боковые стенки тигля обогревались кольцевым электрическим нагревателем 4 создающим тепловую мощность в 960 Вт. С внешней стороны нагреватель и тигель были теплоизолированы муллитовым картоном 5 толщиной 10 мм. Сверху тигель прикрывался крышкой из муллитового картона 6. Тигель изготавливался из листа нержавеющей стали ($d=1 \text{ мм}$). Внутренняя поверхность стенок тигля была покрыта защитной обмазкой.

Дно тигля было водоохлаждаемым, куда во время эксперимента через входной (7) и выходной (8) патрубки подава-

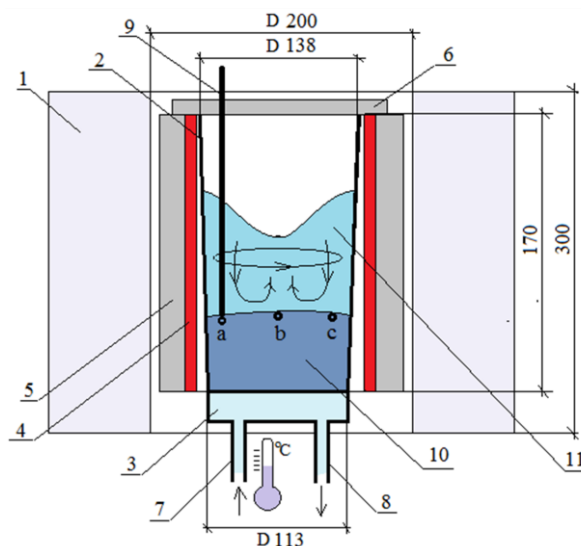


Рис. 1. Схема центральной части экспериментальной установки. 1 – МГД перемешиватель; 2 - тигель; 3 - водоохлаждаемое дно; 4 - кольцевой нагреватель; 5 - теплоизоляция; 6 - муллитовая крышка; 7 - входной патрубок для воды; 8 - выходной патрубок для воды; 9 - измерительный стержень; 10 - твердая фаза металла; 11 - жидкий металл; a, b, c – точки на поверхности фронта кристаллизации для измерения высоты его подъема над дном тигля

лась и отводилась вода (см. рис. 1). Температура воды и ее расход на входе были постоянными, разница температуры подаваемой и отводимой воды измерялась при помощи двух хромель – алюмелевых термопар. Для измерения высоты, на которую поднимается фронт кристаллизации расплава алюминия (в процессе эксперимента) через определенные промежутки времени, в тигель, до контакта с застывшим металлом, опускался тонкий стальной измерительный стержень 9, покрытый защитной обмазкой.

В процессе эксперимента алюминий А0 ($3\ 870 \pm 20$ г) расплавлялся в графитовом тигле в печи сопротивления. Температура расплава доводилась до 770°C . Включался кольцевой нагреватель мощностью 960 Вт, и температура стенок тигля в перемешивателе доводилась до 500°C . С помощью двух регулируемых трехфазных источников питания задавалось определенное значение индукции бегущего и вращающегося магнитных полей в рабочем объеме МГД-перемешивателя. Включалась подача воды на водоохлаждаемое дно тигля. Расход и температура воды на входе поддерживалась постоянными, а разность температур на входе и выходе измерялась хромель алюминиевыми термопарами.

Жидкий металл из графитового тигля переливался в тигель с водоохлаждаемым дном, установленным в рабочем объеме МГД-перемешивателя. После этой процедуры с интервалом в 120 с при помощи измерительного стержня измерялась высота фронта кристаллизации металла в тигле. Измерение высоты осуществлялось в точках *a, b, c* на поверхности фронта кристаллизации металла (см. рис.1). Измерения производились последовательно, поэтому время этих трех измерений составляло 20–30 с. В качестве результата бралось среднее значение этих измерений. Как показали проведенные эксперименты, зависимость высоты фронта кристаллизации от времени процесса кристаллизации для всех экспериментов с различными режимами МГД-перемешивания

близка к линейной. Используя это приближение, скорость продвижения фронта кристаллизации и ее погрешность при различных режимах МГД-перемешивания определялась путем обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов.

Изменение интенсивности тороидального и полоидального течений при различных режимах МГД-перемешивания задавалось изменением величин бегущего и вращающегося магнитных полей в рабочем объеме МГД-перемешивателя. Непосредственное измерение скорости течения жидкого алюминия является весьма сложной задачей. Скорости течения в эксперименте при различных значениях бегущего и вращающегося магнитных полей можно оценить по результатам физических и численных экспериментов [11–13]. Наш эксперимент, в котором азимутальная скорость жидкого алюминия определялась механической «вертушкой», показал, что при вращающемся магнитном поле с индукцией 8,08 мТ максимальная азимутальная скорость жидкого алюминия составила 1 м/с [13]. Как показывают численные эксперименты, скорость полоидального течения значительно меньше и составляет несколько сантиметров в секунду [14].

Эксперимент и его результаты

Скорость кристаллизации жидкого металла в тигле зависит от возбуждаемого в его объеме течения, которое, перенося тепло к фронту кристаллизации, замедляет скорость его продвижения [14]

В наших экспериментах исследовалось влияние различных режимов МГД-перемешивания на скорость продвижения фронта кристаллизации в тигле круглого поперечного сечения. Для этого устанавливался определенный режим работы МГД-перемешивателя. Жидкий алюминий заливался в тигель. Включалась подача воды с фиксированным расходом для охлаждения дна тигля. Специальным стержнем через равные промежутки времени в 120 с измерялась высота фронта кристаллизации относительно дна

тигля. Как показали результаты эксперимента (рис. 2), в случае, когда боковые стенки тигля не обогреваются, скорость продвижения фронта кристаллизации сначала растет с увеличением бегущего магнитного поля до 2,16 мТ (фазовая скорость поля была направлена вниз), а затем падает, и после увеличения магнитного поля свыше 5,4 мТ скорость фронта снова возрастает.

Подобным образом ведет себя скорость продвижения фронта кристаллизации в случае, когда боковые стенки тигля обогреваются нагревателем мощностью 960 Вт. Отличие состоит лишь в том, что минимум скорости продвижения фронта кристаллизации наступает при более высоких значениях бегущего поля – 10,8 мТ.

Похожая зависимость наблюдалась и в экспериментах с обогреваемыми боковыми стенками тигля, когда фазовая скорость бегущего магнитного поля была направлена вверх. При этом рост значения скорости продвижения фронта кристаллизации после ее минимального значения с увеличением индукции бегущего поля происходил слабее (см. рис. 2). В этих случаях полоидальное течение переносит нагретый жидкий металл верхней части

объема тигля вниз к фронту кристаллизации и тем самым уменьшает скорость кристаллизации расплава [15]. При подогреве боковых стенок полоидальное течение переносит большее количества тепла, поэтому минимальное значение скорости продвижения фронта кристаллизации меньше, чем в случае отсутствия обогрева стенок тигля. Последующее возрастание скорости продвижения фронта кристаллизации с увеличением интенсивности полоидального течения, по нашему мнению, вероятно, обусловлено перестройкой топологии полоидального течения с ростом его интенсивности. Некоторая разница в зависимостях скорости продвижения фронта кристаллизации при возбуждении полоидального течения бегущими магнитными полями с фазовыми скоростями, направленными вниз либо вверх, вероятно, связана с тем, что когда поле «бежит» вверх, течение уносит тепло от нагретых стенок вверх, и уже затем, несколько охладившись на поверхности, поток жидкого металла переносит тепло вниз к фронту кристаллизации.

В случае, когда имеет место подогрев боковых стенок тигля, но течение в жидком металле создается только вращающимся магнитным полем (рис. 3), наблюдается снижение скорости продвижения фронта кристаллизации с выходом на некоторое постоянное значение при увеличении величины магнитного поля. Это значение по

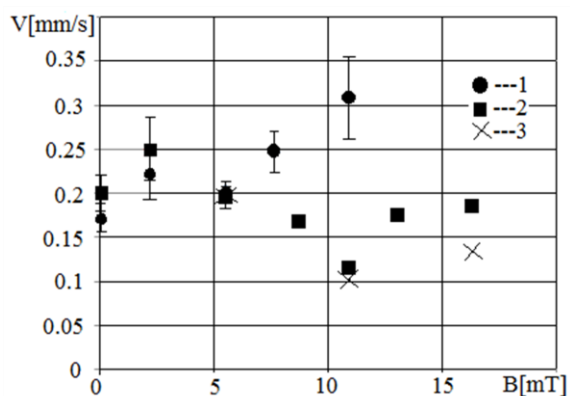


Рис. 2. Зависимость скорости продвижения фронта кристаллизации жидкого алюминия в тигле от величины бегущего магнитного поля. Фазовая скорость бегущего магнитного поля направлена вниз - 1, 2 (1 - подогрев боковых стенок тигля отсутствует; 2 - осуществляется подогрев боковых стенок тигля нагревателем мощностью 960 Вт). Фазовая скорость бегущего магнитного поля направлена вверх - 3 (3 - осуществляется подогрев боковых стенок тигля нагревателем мощностью 960 Вт).

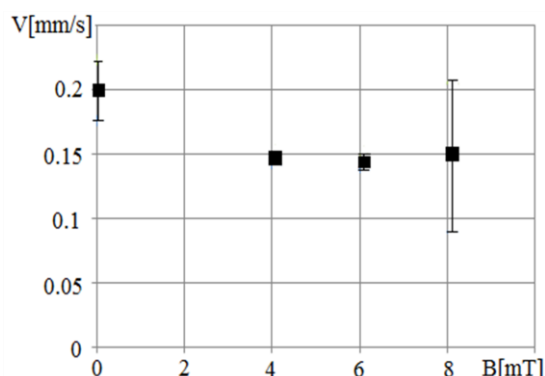


Рис. 3. Зависимость скорости продвижения фронта кристаллизации жидкого алюминия в тигле от величины вращающегося магнитного поля. Осуществляется подогрев боковых стенок тигля нагревателем мощностью 960 Вт

величине выше, чем минимальное при полоидальном течении, что связано, по нашему мнению, с тем, что тороидальное течение хуже переносит тепло от нагретых стенок к фронту кристаллизации, чем полоидальное. Тороидальное течение в результате трения о дно порождает очень слабое полоидальное течение, которое, главным образом, и обеспечивает конвективный механизм переноса тепла (см. рис. 3).

При возрастании интенсивности вращения металла в тигле скорость движения фронта кристаллизации монотонно снижается, вероятно, вследствие того, что каких-либо перестроек тороидального течения с ростом скорости вращения металла не происходит.

Как показал эксперимент, наложение вращающегося магнитного поля (вызывающее тороидальное течение в тигле) на жидкий металл с полоидальным течением (вызванным бегущим «вниз» магнитным полем) неоднозначно влияет на скорость продвижения фронта кристаллизации в тигле. При малых значениях вращающегося магнитного поля с увеличением его индукции скорость продвижения фронта кристаллизации заметно снижается по сравнению со случаем воздействия только бегущего «вниз» магнитного поля. При более высоких значениях вращающегося магнитного поля (выше 4 мТ) скорость кристаллизации возрастает и даже несколько превосходит изначальную скорость (рис. 4).

Как было показано в экспериментах [13, 16], полоидальное и тороидальное течения, возбуждаемые бегущим и вращающимися магнитными полями в кристаллизующемся алюминии, влияют на структуру и механические свойства получаемых слитков. Так, усиление тороидального течения ведет к измельчению кристаллической структуры, в то время как полоидальное течение, обеспечивающее основной перенос тепла, влияет на скорость продвижения фронта кристаллизации и его форму. В работе [16] показано, что зерно в структуре слитка уменьшается с ростом интенсивности вращающегося магнитного поля (с рос-

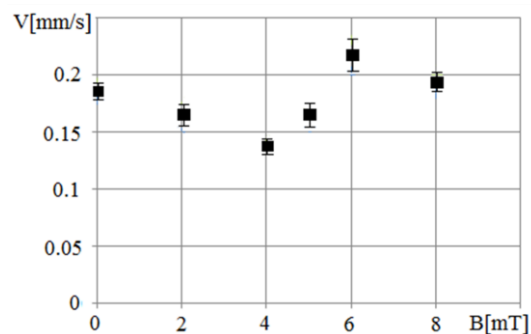


Рис. 4. Зависимость скорости продвижения фронта кристаллизации жидкого алюминия в тигле от величины вращающегося магнитного поля при действии бегущего «вниз» магнитного поля 16,2 мТ. Осуществляется подогрев боковых стенок тигля нагревателем мощностью 960 Вт

том скорости тороидального течения), при этом улучшаются механические характеристики алюминиевого сплава. С другой стороны, при усилении полоидального течения (генерируемого бегущим «вниз» магнитным полем) зерно в структуре слитка растет в размере [16].

Заключение

Из наших экспериментов (см. рис. 4) видно, что скорость продвижения фронта кристаллизации металла в тигле при действии вращающегося магнитного поля уменьшается с увеличением этого поля. Когда на кристаллизующийся металл действует только бегущее магнитное поле, скорость его кристаллизации сначала падает, а затем возрастает (см. рис. 3). При одновременном действии вращающегося и бегущего магнитного поля скорость кристаллизации металла сначала падает, затем растет при усилении вращающегося магнитного поля (см. рис. 4). Скорость кристаллизации определяет скорость вытягивания непрерывного слитка из кристаллизатора машины непрерывного литья. Таким образом, зная зависимости скорости продвижения фронта кристаллизации от интенсивности полоидального и тороидального течения можно подобрать режим МГД-перемешивания, обеспечивающий наилучшее сочетание скорости вытягивания слитка (из кристаллизатора машины непрерывного литья) и улучшение его структуры.

Библиографический список

1. *Protokovilov I.V.* MHD-technologies in metallurgy. Modern Electrometallurgy // General Questions of Metallurgy. – 2011. – Vol. 105. – №. 4. – P. 32–41.
2. *Timofeev V., Khatsayuk M.* Theoretical Design Fundamentals for MHD Stirrers for Molten Metals // Magnetohydrodynamics. – 2016. – Vol. 52. – № 4. – P. 495–506.
3. *Mapelli C., Gruttadauria A., Peroni W.* Application of electromagnetic stirring for the homogenization of aluminium billet cast in a semicontinuous machine // Journal of Materials Processing Technology. – 2010. – Vol. 210. – P. 306–314.
4. *Yu W., Ma W., Ly G., Xue H., Li S., Dai Y.* Effect of electromagnetic stirring on the enrichment of primary silicon from Al-Si melt // Journal of Crystal Growth. – 2014. – Vol. 405. – P. 23–28.
5. *Mohammed M.N., Omar M.Z., Salleh M.S., Alhawari K.S., Kapranos P.* Semisolid metal processing techniques for nondendritic feedstock production // The Scientific World Journal. – 2013. – Vol. 2013. – article ID752175, – P. 16 DOI:10.1155/2013/752175.
6. *Borisov V.G.* Production technologies of shaped articles made of aluminum alloys using the thixoforming technique. Problems and solutions // Light Alloy Technology. – 2016. – №. 2. – P. 71–79.
7. *Borisov V.G.* Process for production of aluminum-alloy ingots with non-dendritic thixotropic structure // Metallurgist. – 2008. – Vol. 52. – № 11–12. – P. 672–676.
8. *Borisov V.* Aluminum-Dased Composite Billets Produced by Plasma Injectin and Thixocasting// Light metal Age. – April 2017. – P. 48–51.
9. *Gelfgat Yu., Skopis M., Grabis J.* Electromagnetically driven vortex flow to introduce small solid particles into liquid metal // Magnetohydrodynamics. – 2005. – Vol. 41. – № 3. – P. 249–254.
10. *Khripchenko S., Dolgikh V., Kiselkov D.* Experiment on Injection of SiC and BN Nanoparticles into Liquid Aluminum Using MHD Stirring with Subsequent Crystallization of the Melt // IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1945. DOI:10.1088/1742-6596/1945/1/012017.
11. *Kolesnichenko I., Khalilov R., Khripchenko S., Pavlinov A.* MHD Stirrer for cylindrical molds of continuous casting machines fabricated aluminium alloy // Magnetohydrodynamics. – 2012. – Vol. 48. – № 1. – P. 221–233.
12. *Barami E., Mikhailovich B., Shukrun T., Sukoriansky S., Zemach E.* Heat transfer enhancement in liquid metal by rotating magnetic field // Magnetohydrodynamics. – 2017. – Vol. 53. – № 1. – P. 201–211.
13. *Denisov S., Dolgikh V., Khripchenko S., Kolesnichenko I., Nikulin I.* 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. – № 4. – P. 407–422.
14. *Kolesnichenko I., Pavlinov A., Khalilov R.* Movement of the solid–liquid interface in gallium alloy under the action of rotating magnetic field // Magnetohydrodynamics. – 2013. – Vol. 49. – №. 1. – P. 191–197.
15. *Антонов П.В., Бердников В.С.* Зависимость фронта кристаллизации и скорости роста слитка кремния от режима теплообмена в методе Бриджмена-Стокбаргера // Прикладная механика и техническая физика. – 2012. – Т. 53. – № 6. – С. 65–77.
16. *Khripchenko S.Yu., Denisov S.A., Dolgikh V.M., Shestakov A.V., Siraev R.R.* Structure of solidified aluminum melt in crucibles of circular and square cross-sections in reverse regimes of rotating magnetic field // Magnetohydrodynamics. – 2019. – Vol. 55. – № 4. – P. 437–445.

**MOVEMENT SPEED OF THE DIRECTIONAL CRYSTALLIZATION FRONT
OF ALUMINUM IN A CYLINDRICAL CRUCIBLE UNDER DIFFERENT MHD-STIRRING
MODES**

S.Y. Khripchenko, V.M. Dolgikh

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS

For citation:

Khripchenko S.Y., Dolgikh V.M. Movement speed of the directional crystallization front of aluminum in a cylindrical crucible under different MHD-stirring modes // Perm Federal Research Center Journal. – 2022. – № 3. – P. 7–13. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2022.3.1>

To improve the quality of continuous cylindrical ingots of aluminum and its alloys produced in continuous casting machines, MHD-stirring is implemented in the hot top of the mold. For this purpose, poloidal and toroidal flows are excited in the molten metal. These flows significantly affect heat the transfer from the hot metal entering the hot top of the mold to the cooling zone, where the

crystallization front is formed. The experiment showed that the toroidal flow first reduces the speed of the advance of the crystallization front, and then, as the rotating field magnitude increases, the speed ceases to change noticeably. The poloidal flow also first reduces the crystallization front speed, but somewhat faster than the toroidal flow, and there is a minimum on the curve of the dependence of the front advance speed on the traveling field magnitude, after which the crystallization front speed begins to increase. It has been found that under the combined action of travelling and rotating magnetic fields, the speed of advance of the crystallization front first decreases, and then increases.

Keywords: traveling magnetic field, rotating magnetic field, speed of movement of the crystallization front, liquid aluminum, MHD- stirring, toroidal and poloidal flow, experiment.

Сведения об авторах

Хрипченко Станислав Юрьевич, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМСС УрО РАН»), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 3; e-mail: sk@icmm.ru

Долгих Вениамин Михайлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: Dolgikh@icmm.ru

Материал поступил в редакцию 17.04.2022 г.