

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»**

УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке

ФГАОУ ВО «Уральский
федеральный университет
имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина»

Германенко А. В.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию
Кучинского Михаила Юрьевича
на тему «Электротехнология перемешивания жидкой сердцевины слитков в
многоручьевом литейном комплексе»
по специальности 05.09.10 – Электротехнология
на соискание учёной степени кандидата технических наук

В представленных на отзыв диссертационной работе и автореферате Кучинского Михаила Юрьевича выполнены исследования, направленные на решение научной проблемы прогнозирования качества литой структуры при литье специальных алюминиевых сплавов в многоручьевой кристаллизатор скользящего с применением электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины кристаллизующегося слитка.

Актуальность темы

Специальные алюминиевые сплавы, обладающие повышенными физико-механическими свойствами приобрели важное значение в промышленности. Основную часть всего объема производства алюминиевых сплавов занимают деформируемые сплавы. Решающим фактором успешного развития промышленности деформируемых алюминиевых сплавов является качество слитков, которое во многом определяется условиями их кристаллизации. Одним из распространенных и эффективных способов управления условиями кристаллизации слитка является принудительное перемешивание жидкой сердцевины кристаллизующегося слитка. Наибольшее распространение в металлургии получили электромагнитные

перемешиватели, воздействующие на расплав вращающимся или бегущим магнитным полем. Перемешивание жидкого металла под воздействием электромагнитного поля дает возможность повысить качество слитка за счет получения однородной кристаллической структуры сплава и равномерного химического состава по объему слитка.

В настоящее время электромагнитное перемешивание жидкой сердцевины слитка используется в основном на литейных комплексах, предназначенных для получения одиночных крупногабаритных слитков. Оснащение многоручьевых литейных комплексов электромагнитными перемешивателями является перспективным, но в большинстве случаев достижение требуемых параметров электромагнитного поля осложняется ограниченными геометрическими размерами перемешивателя. Для этого необходима разработка индуктора специальной конструкции, обладающей компактными габаритами, позволяющими установить его на многоручьевом литейном комплексе. На основании вышеизложенного тема работы является безусловно актуальной.

Цель диссертации формулируется автором как разработка электротехнологии перемешивания жидкой сердцевины алюминиевых слитков в многоручьевой литейной машине, обеспеченной созданием цилиндрического индуктора и режимами его работы. Для достижения поставленной цели автор предлагает решить ряд задач:

- провести анализ технологий и устройств электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины алюминиевых слитков в кристаллизаторах скольжения;
- разработать сопряженные математические модели для расчета электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов в системе «индуктор-слиток» установки электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины алюминиевого слитка;
- исследовать влияние конструкции и режимов работы цилиндрического индуктора на тепловые и гидродинамические процессы, обеспечивающие требуемый профиль скоростей движения металла в жидкой сердцевине кристаллизующегося слитка;
- разработать методики экспериментального исследования гидродинамических процессов в жидкой сердцевине слитка на основе созданной физической модели цилиндрического индуктора для перемешивания жидкой сердцевины слитка;
- сравнить результаты физического и математического моделирования с целью верификации данных, полученных расчетными методами.

Поставленные задачи и полученные результаты в рамках диссертации позволяют сделать заключение о достижении цели работы.

Научная новизна диссертации выражается в следующих тезисах, сформулированных автором:

1. Построены математические модели для совместного анализа тепловых, электромагнитных и гидродинамических процессов в системе «индуктор-слиток», учитывающие фазовые состояния кристаллизующегося слитка и магнитогидродинамические процессы, протекающие в области жидкой сердцевины.

2. Установлены новые закономерности изменения фазовых состояний кристаллизующегося слитка, а именно:

- наибольшее влияние на изменение формы фронта кристаллизации оказывает скорость вытягивания слитка;

- конструкция индуктора с пятью зубцами имеет наилучшие показатели по создаваемым интегральным усилиям в слитке;

- режим питания индуктора в частотном диапазоне $f=5-10$ Гц при использовании схемы с вращающимся магнитным полем обеспечивает равномерное перемешивание жидкой сердцевины слитка вдоль всего фронта кристаллизации.

3. Впервые предложена и опробована методика ультразвукового исследования поля скоростей в жидкой сердцевине слитка с использованием физической модели электромагнитного перемешивания.

На наш взгляд, наибольшее научное значение имеют сделанные автором исследования электромагнитных и гидродинамических процессов в кристаллизаторе с электромагнитным перемешиванием жидкой фазы слитка при различных вариантах питания двухфазного индуктора, выполненные с помощью разработанной автором компьютерной полевой модели.

Ценность для науки и практики выражается в предложенной компактной конструкции цилиндрического индуктора, за счет изменения схемы подключения обмоток и параметров питающей сети которого достигается формирование в жидкой фазе кристаллизующегося слитка потоков металла, охватывающих до 90 % поверхности фронта кристаллизации., а также в разработанной методике экспериментального исследования гидродинамических процессов в жидком металле на основе моделирующих сплавов.

Обоснованность и достоверность результатов работы обеспечивается применением известных теорий электромеханики и магнитной гидродинамики, использованием апробированных программных средств моделирования и подтверждается совпадением в пределах погрешности результатов расчёта по разработанным моделям с результатами измерений при физическом моделировании при одинаковых с ними условиях проведения модельного и физического эксперимента.

Оценка содержания диссертации

Объем и содержание диссертационной работы по степени научной новизны и практической значимости удовлетворяет требованиям ВАК Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Анализ содержания диссертационной работы подтверждает её завершенность. Содержание диссертации изложено общепринятыми научными терминами, соблюдая логическую последовательность. Диссертационная работа соответствует специальности 05.09.10 – Электротехнология.

Результаты диссертационной работы характеризуются, как имеющие научное обоснование и завершенные, обеспечивающие основу для дальнейших исследований.

Замечания по диссертации

1. В тексте автореферата и диссертации неоднократно упоминается дендритный параметр. Что это за параметр, ориентация, размер зерен или может быть их тип (равноосный или столбчатый)? Необходимо более конкретно сформулировать на какой именно параметр ожидается влияние.
2. Из текста диссертации не совсем понятно, какими аспектами характеризуется именно многоручьевая конструкция литейной машины с электромагнитным перемешиванием жидкой сердцевины слитка, которая выносится в название работы? Взаимная индуктивность, вопросы питания и и т.д., или просто рассматривался один кристаллизатор скольжения в приложении к многоручьевому литью? Будут ли сказываться ограничения в радиальном размере индуктора на насыщении спинки его магнитопровода?
3. В п. 2 положений, выносимых на защиту, указано: "Наиболее эффективным режимом воздействия, обеспечивающим получение мелкодисперсной структуры цилиндрического слитка, является режим электромагнитного перемешивания при частотном диапазоне $f=5-10$ Гц с вращающимся магнитным полем. Каким образом это определено, имеется ли экспериментальное подтверждение данному тезису? Какой механизм лежит в основе уменьшения зерна? Также не совсем понятно, что автор понимает под вращающимся магнитным полем в исследуемой конструкции индуктора с линейным расположением катушек вдоль вертикальной оси.
4. В п. 2 научной новизны приводится: "Установлены новые закономерности изменения фазовых состояний кристаллизующегося слитка, а именно: - наибольшее влияние на изменение формы фронта кристаллизации оказывает скорость вытягивания слитка." Влияние скорости вытягивания слитка на форму лунки это хорошо известный факт в литейной практике. Если наибольшее влияние на форму лунки оказывает именно скорость кристаллизации, то с какими еще факторами проводилось сравнение? Не совсем понятно, почему было сделано допущение, что электромагнитно вынужденный поток не будет деформировать фронт кристаллизации? Данное явление экспериментально показано, например, в работе: G. Losev and I. Kolesnichenko: *J. Cryst. Growth*, 2019, vol. 528, p. 125249. Подобное

явление также наблюдалось при литье медно-никелевых сплавов с применением электромагнитного перемешивания жидкой фазы кристаллизующегося слитка, что упоминалось, например, в диссертационной работе Б.А. Сокунова "Исследование цилиндрических индукторов для электромагнитного воздействия на расплав в кристаллизаторе", 1981 г.

5. В автореферате не указано, какой сплав является целевым. Если это, распространенный литейный сплав AlSi, то полезно было бы упомянуть известные работы [1-3] по исследованию электромагнитного перемешивания при затвердевании AlSi сплава. Более того, в работе [4] отмечается, что непрерывное электромагнитное перемешивание бегущим полем может провоцировать дефекты, такие как образование центральной осевой сегрегации, сепарации и сегрегации в форме "рыбьей кости" (от англ. fish bone) или "елки" (от англ. Christmas tree). Сравнение полученных автором результатов с известными работами в данной области и описанными в них механизмами влияния электромагнитно вынужденного потока на образование структуры дополнительно усилило бы диссертацию.

[1] S. Eckert, P.A. Nikrityuk, B. Willers, D. Raebiger, N. Shevchenko, H. Neumann-Heyme, V. Travnikov, S. Odenbach, A. Voigt, and K. Eckert // *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, 2013, vol. 220, pp. 123–37.

[2] J.C. Jie, Q.C. Zou, J.L. Sun, Y.P. Lu, T.M. Wang, and T.J. Li // *Acta Mater.*, 2014, vol. 72, pp. 57–66.

[3] V. Metan, K. Eigenfeld, D. Raebiger, M. Leonhardt, and S. Eckert // *J. Alloys Compd.*, 2009, vol. 487, pp. 163–72.

[4] A. Noepfel, A. Ciobanas, X.D. Wang, K. Zaidat, N. Mangelinck, O. Budenkova, A. Weiss, G. Zimmermann, and Y. Fautrelle // *Metall. Mater. Trans. B*, 2010, vol. 41, pp. 193–208.

6. В диссертации сделано допущение, что при числе $Re > 40000$ наблюдается переход в турбулентный режим. Однако критическое значение Re в МГД-устройствах зависит не только от параметров гидродинамической системы, но и от параметров магнитного поля, взаимодействующего с потоком проводящей жидкости, характеризующихся критериями Re_m , Ha , St . Например, при значениях $Ha > 100$ в закрытых каналах поток, как правило, становится ламинарным даже при значительных скоростях [5, 6].

[5] Christophe Gissinger et.al. «Instability in electromagnetically driven flows I», *Phys. Of fluids* 28, 2016

[6] Oleg Zikano et.al. «Laminar-Turbulent Transition in Magnetohydrodynamic Duct, Pipe, and Channel Flows», *Applied Mechanics Reviews* 66(3), 2014

7. В работе приводится анализ влияния параметров источника питания на процесс перемешивания. В качестве критерия оценки анализируются распределения поля скорости в определенный период времени. Из

картин распределения скорости, приведенных на рис. 3.16, 3.17 при разных шкалах совершенно не очевиден сделанный автором вывод, что перемешивание предпочтительнее проводить при питании индуктора от источника питания с частотой тока 5 Гц. Из-за этого возникают вопросы к выводам автора об эффективности использования низких частот при таком перемешивании, так как на приведенных картинах распределения поля скоростей максимальные значения наблюдаются при более высоких частотах. Следует добавить, что критерий скорости не всегда корректно отображает перенос массы в пространстве. Более корректно использовать в таких исследованиях перенос и концентрацию примесей. Максимально наглядно выглядит сравнение микро- и макроструктур получаемых слитков при различных вариантах питания индуктора.

8. Автор умело оперирует безразмерными параметрами и уместно включает их в работу. Однако в таком важном элементе как экспериментальная валидация значение скоростей на порядок ниже, чем в установке для перемешивания алюминия. В главе не приводится оценка числа Рейнольдса для эксперимента, поэтому не ясно, насколько оно будет в этом случае отличаться от числа Рейнольдса в реальной установке? Одной из целей применения безразмерных параметров является корректное масштабирование протекающих процессов. Необходимо показать корректность валидации модели на сопоставимых числах $Re \sim 40000$.

Подтверждение основных результатов диссертации в научной печати и апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: VII Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Электротехнология. Энергетика» (г. Новосибирск, 2015 г.); VIII Международном конгрессе «Цветные металлы и минералы» (г. Красноярск, 2016); IX Международном конгрессе «Цветные металлы и минералы» (г. Красноярск, 2017), XI Международном конгрессе «Цветные металлы и минералы», (г. Красноярск, 2019), III Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Борисовские чтения», (г. Красноярск, 2021).

По теме диссертационной работы опубликованы 13 работ, в том числе 3 публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 публикации в изданиях, включенных в базы Scopus и Web of Science, 1 патент РФ на изобретение, 7 публикаций в прочих изданиях.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы и её основные положения.

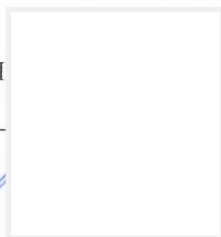
Заключение

Диссертация Кучинского Михаила Юрьевича имеет единую структурную целостность и является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований содержатся решения по разработке электротехнологии, позволяющей повысить физико-механические свойства алюминиевых слитков.

Диссертация соответствует критериям, установленным п.9 "Положения о порядке присуждения учёных степеней" постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а её автор Кучинский Михаил Юрьевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук.

Диссертационная работа и отзыв рассмотрены на заседании кафедры «Электротехника» ФГАОУ ВО «Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», протокол №14 от «08» июля 2022 г.

Заведующий кафедрой
«Электротехника»
ФГАОУ ВО «Уральский
федеральный университет
имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», д.т.н., доцент
+7(343)375-47-51
vefrizen@urfu.ru



Фризен Василий Эдуардович

Отзыв получен 29.08.2022 М.Ю. Кучинский

С отзывом ознакомлен

Фризен 30.08.2022 Кучинский М.Ю.

Сведения о ведущей организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Адрес: 620002, Уральский федеральный округ, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Телефон: +7(343) 375-45-07. E-mail: rector@urfu.ru