

УДК 621.74: 621.313:658.382.:538.4

Фиксен В. Н.**РАФИНИРОВАНИЕ, ЛИТЬЁ И ПРИГОТОВЛЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ**

Задачи прикладной магнитной гидродинамики в области литейного производства и металлургии состоят в совершенствовании существующих и разработке новых технологических процессов. Прогресс в этой области происходил медленно, однако к настоящему времени в некоторых технологиях достигнуты существенные успехи. В частности, к ним относятся разработка электромагнитных перемешивателей бегущего магнитного поля для отражательных плавильных печей [1] и использование электромагнитных насосов для литья под низким регулируемым давлением в технологии Cosworth Process [2]. Очевидно, что к настоящему времени потенциальные возможности применения средств магнитной гидродинамики в литейном производстве и металлургии далеко не исчерпаны. Дальнейший прогресс обусловлен не только новыми идеями, но и разработкой более совершенных огнеупорных и электротехнических материалов. Кроме того, прогрессу заметно способствует применение современной элементной базы в электрооборудовании, предназначенном для питания и управления электромагнитными устройствами.

Целью данной работы является представление разработанных во ФТИМС НАН Украины новых технологий рафинирования, литья и приготовления алюминиевых сплавов с использованием магнитодинамической установки МДН-6А [3] и электромагнитного перемешивателя нового типа [4].

Установки МДН-6А являются миксерами – дозаторами. Они служат для хранения расплавленного металла при заданной температуре, его дозированной разливки в литейные формы и другие металлоприёмники и совмещают функции электромагнитного насоса с функциями индукционной канальной печи. Разработан ряд модификаций установок с полезной вместимостью 160-630 кг и массовой подачей алюминиевого сплава 0,15–10 кг/с. Установка МДН-6А помимо нагрева металла и его дозирования способна обеспечить разнообразные варианты циркуляции расплава. Кроме того, в объёме жидкометаллической ванны имеются зоны, в которых проявляются электродинамические эффекты, обусловленные взаимодействием электрических токов величиной до 10000 А с собственным магнитным полем. Интенсивность этих эффектов зависит как от плотности электрического тока, протекающего в определённой зоне ванны, так и от её конфигурации. Указанные возможности магнитодинамической установки были использованы для повышения эффективности и экономичности процессов рафинирования расплава продувкой аргоном и фильтрования расплава через пеночерамический фильтр. Ради объективности следует отметить, что магнитодинамическая установка не является необходимым условием воспроизведения указанных функций и физических эффектов. Возможно создание и других устройств, в которых обеспечивались бы заданный режим циркуляции металла и аналогичные электродинамические эффекты.

Известно [5, 6], что при рафинировании алюминиевых сплавов аргоном в промышленности используют вращающийся ротор для диспергирования пузырьков газа и распределения их по объёму расплава. По такой технологии удаётся получить пузырьки диаметром 4–5 мм, причём для уменьшения «мёртвых зон», периодически изменяют направление вращения ротора. Расход аргона составляет 10 дм³/мин для массы металла 500 кг или 0,4 дм³/кг. Недостатки технологии состоят в том, что при её использовании не удаётся повысить степень диспергирования пузырьков газа, а поверхность ванны неспокойна, что способствует окислению расплава. Кроме того, поскольку рафинирование производят в плавильной печи, а не в дозаторе, то при переливе в ковш происходит некоторое увеличение содержания водорода и оксидных включений в расплаве, подлежащем заливке в литейные формы.

Согласно схеме (рис. 1) процесс продувки и фильтрования производились в магнитодинамической установке одновременно. Установка имеет Ш-образный канал, в котором происходит индукционный нагрев металла, а в рабочей зоне – зоне соединения трёх ветвей канала, создаётся электромагнитная сила, вектору которой в зависимости от поставленных технологических задач можно придать любое направление. В данном случае, на левом устье расположена специальная фурма для продувки металла аргоном, на правом пенокерамический фильтр, а на центральном устье металлопровод. Электромагнитные системы установки включают в режим, который обеспечивает циркуляцию расплава по направлению, указанном стрелками. Жидкий металл поступает через правое устье в Ш-образный канал через фильтр и выходит через левое устье, на котором расположена фурма, которая придаёт потоку из устья горизонтальное направление. Пузырьки аргона распределяются потоком по объёму ванны.

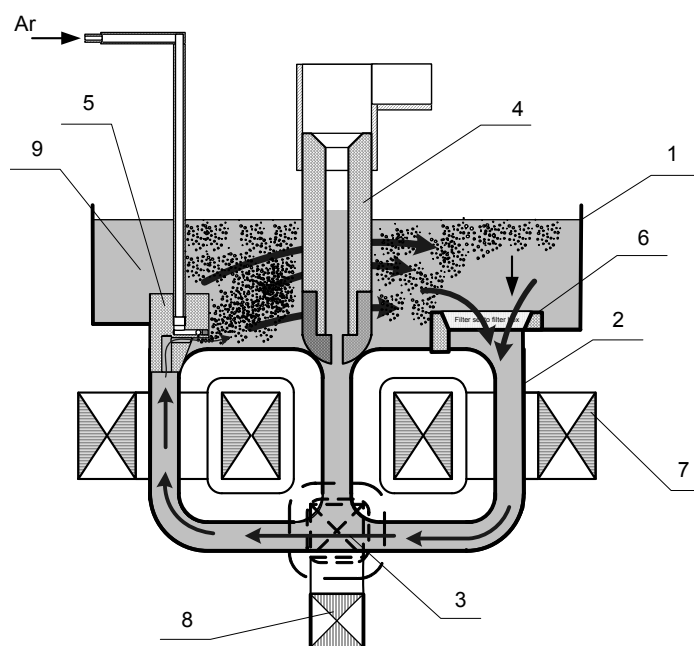


Рис. 1. Схема процесса рафинирования алюминиевых сплавов в магнитодинамической установке перед разливкой в литейные формы:

1 – тигель; 2 – Ш-образный канал; 3 – рабочая зона; 4 – металлопровод; 5 – фурма; 6 – фильтр; 7 – индукторы; 8 – электромагнит; 9 – жидкий алюминиевый сплав

В экспериментах были получены пузырьки диаметром менее миллиметра. Очевидно, что чем мельче пузырьки, тем больше суммарная площадь их поверхности при равном суммарном объёме, а соответственно и выше эффективность удаления водорода из алюминиевого расплава. Для оценки роли электромагнитных факторов в диспергировании пузырьков сравнивали продувку с отключёнными и включёнными электромагнитными системами установки. В первом варианте всплывали крупные пузыри, по визуальной оценке около 50 мм в диаметре, несмотря на то, что продувка осуществлялась через материал с мелкими порами с размером 0,01–0,2 мм. При включении электромагнитных систем крупные пузыри исчезают и на поверхности жидкометаллической ванны появляются мелкие пузырьки. Следует отметить, что их размеры не одинаковы. Предварительные исследования показали следующее распределение размеров пузырьков: 5–2 мм – 10 %; 2–1 мм – 30 %; меньше 1 мм – 60 %. Методика исследования включала в себя измерение скорости горизонтального потока с помощью трубки Пито, измерение расстояния по горизонтали от зоны диспергирования до места всплывания пузырьков и фотосъёмку. С определёнными допущениями и поправками вычисляли время всплывания пузырька и соответственно вертикальную составляющую его

скорости. Диаметры пузырьков вычисляли по формуле Стокса, подставляя в неё значение скорости их всплывания. Параллельно проводился анализ результатов фотосъёмки. Полученные данные пока не претендуют на построение точного графика функции распределения, однако, даже визуальная оценка и анализ фотосъёмок свидетельствуют о том, что диспергирование пузырьков аргона в алюминиевом расплаве под действием горизонтального потока и электромагнитных сил происходит эффективно. По сравнению с известными методами продувки, в которых используют вращающийся ротор, расход аргона снижается в 2–3 раза при достижении равного результата. Так же важным преимуществом нового метода по сравнению с известными является сохранение спокойного состояния поверхности ванны. Электромагнитный метод диспергирования пузырьков газа в металлическом расплаве обладает принципиальной новизной, поэтому его механизм пока недостаточно изучен. При более детальном раскрытии механизма действия потока расплава, вынужденной конвекции и электромагнитных сил на газ в электропроводной жидкости, технологию можно будет оптимизировать.

Второй элемент схемы рафинирования (рис. 1) – пенокерамический фильтр. Фильтры задерживают неметаллические включения не только механически, но и за счёт их адгезии к материалу фильтра. Именно благодаря адгезии они способны задерживать включения меньшего размера, чем размеры пор. Однако фильтры даже с самыми мелкими порами плохо задерживают включения, имеющие размеры около 1 мкм, поэтому необходимы принципиально новые подходы к этому процессу. Один из них состоит в том, чтобы во время фильтрования пропускать электрический ток через фильтр [7]. При этом в порах фильтра возникает микроциркуляция и усиливается турбулентность течения металла вследствие возникновения электровихревых течений [8]. Происходит локальный разогрев металла из-за повышения плотности электрического тока в сравнении с той, которая имеет место в остальных зонах ванны. Обеспечивается многократное прохождение одного и того же расплава через фильтр. Первые два фактора способствуют повышению адгезии оксидных включений к материалу фильтра, а третий увеличивает вероятность задержания тех мелких частиц, которые не были задержаны в процессе предыдущих циклов фильтрования.

Описанная технология рафинирования, согласно схеме (рис. 1), была успешно опробована в республике Корея, на заводе компании Dong San Tech. CO., LTD, г. Чангвон. Рафинировали литейный сплав А356 (стандарт США), который по химсоставу и свойствам наиболее близок к отечественному сплаву АК7. Исследования качества металла, обработанного по новой технологии, было проведено в заводской лаборатории компании, в Корейском институте материаловедения в г. Чангвоне и во ФТИМС НАН Украины в г. Киеве. Результаты исследований идентичны и подтверждают высокую эффективность технологии [9].

Электромагнитные силы были применены не только для традиционного дозирования расплава открытой струёй в литейные формы, но и в технологической схеме литья под низким давлением [10]. На базе магнитодинамических установок во ФТИМС НАН Украины разработана и успешно внедрена в производство установка литья под низким регулируемым электромагнитным давлением (ЛЭМД) по схеме (рис. 2). В ней взамен сжимаемой газовой среды используется давление, создаваемое электромагнитной силой. Преимущества способа ЛЭМД перед традиционным литьём под низким давлением обусловлены исключением газовой среды из процесса и состоят в следующем: для создания давления на жидкий металл не требуется герметизировать тигель с жидким металлом; при использовании металлопроводов и футеровочных материалов, изготовленных из пористых материалов, не возникает проблем, связанных с проникновением газа через поры; для разогрева металла, создания давления и управления процессом используется один вид энергии – электрический; в расплаве не вносятся железо, поскольку имеется возможность не использовать железосодержащие детали, контактирующие с жидким металлом. Не очевидным преимуществом, но доказанным теоретически и на практике, является возможность более точного управления заданным режимом

заполнением литейных форм. Это связано с тем, что электромагнитные силы практически безынерционны, по сравнению со сжимаемой газовой средой [11]. Новый метод, реализованный на базе магнитодинамической установки, уступает по развиваемому давлению газовому 0,3 мПа против 0,6 мПа. Однако имеется принципиальная возможность, повысить электромагнитное давление до 0,1 мПа [12], что не допускается при использовании газового давления из-за опасности взрыва рабочей камеры установки литья под низким давлением. Технология была внедрена в производство для получения отливок деталей дизельного двигателя.

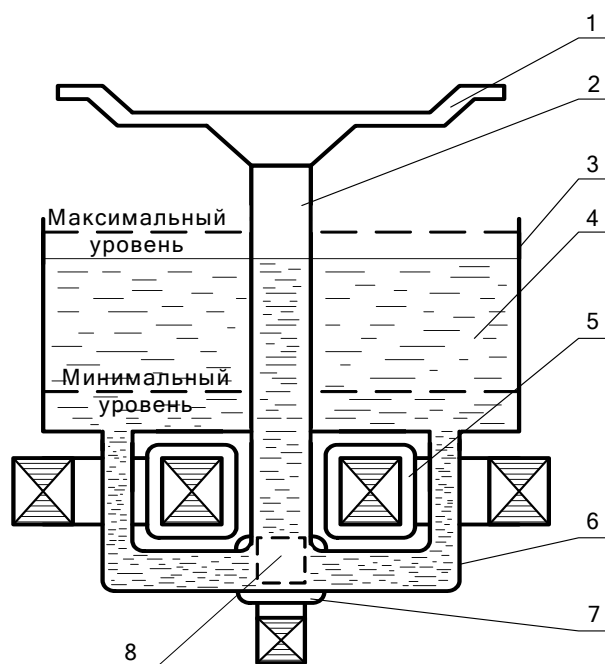


Рис. 2. Схема установки литья под электромагнитным давлением:

1 – полость литейной формы; 2 – металлопровод; 3 – тигель; 4 – жидкий металл; 5 – индуктор; 6 – Ш-образный индукционный канал; 7 – электромагнит; 8 – рабочая зона

Развитием способа ЛЭМД стал процесс литья под электромагнитным давлением РАСЛИТ-ЛЭМД, в котором рационально сочетаются принципы литья под низким давлением и рассредоточения литниково-питающей системы [12, 13, 14]. Заливочное устройство для нового процесса представляет собой двухкамерную установку нового типа, созданную на базе элементов магнитодинамических установок (рис. 3). Форму 1 устанавливают на литниковую плиту 3, имеющую литниковые каналы 4 диаметром 5–10 мм, расположенные в местах, обеспечивающих наилучшее заполнение и питание отливки. Плита 3 расположена на литниковой камере и расплав 5 всегда находится с ней в контакте. Электромагнитная сила в зоне 6 подаёт расплав из металлоприёмника 7 в заливочную камеру 5, а затем через литниковые отверстия 4 в полость литейной формы 2. После затвердевания отливки электромагнитное давление сбрасывается и в заливочной камере расплав устанавливается на уровне литников 4 в плите 3. Форма поднимается вместе с отливкой, которая удаляется из неё с помощью толкателей. Описанный способ литья имеет все преимущества литья под электромагнитным давлением и дополнительно обеспечивает рационализацию процессов заполнения и питания отливок. За счёт этого при получении определённой номенклатуры отливок, например отливок типа рамка, кольцо, крышка, стакан достигается уровень качества изделий и коэффициент использования жидкого металла, недостижимые в традиционной технологии литья под низким давлением. Технология успешно внедрена на Минском подшипниковом заводе при литье сепараторов диаметром от 200 мм до 500 мм для крупногабаритных сферических подшипников. Также успешно были получены малыми сериями и иные типы отливок.

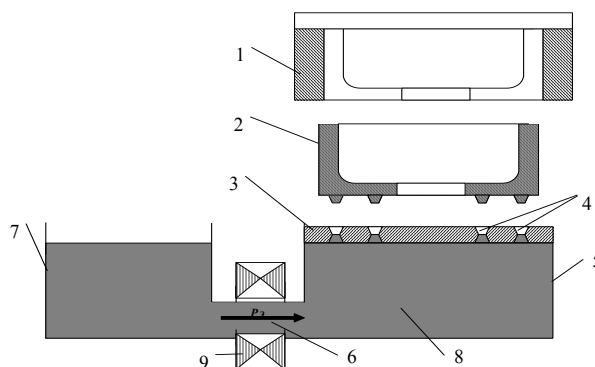


Рис. 3. Схема процесса литья под электромагнитным давлением с использованием рассредоточенной литниково-питающей системы:

1 – литейная форма; 2 – извлечённая из формы отливка; 3 – литниковая плита; 4 – литниковые каналы; 5 – заливочная камера; 6 – зона создания электромагнитного давления; 7 – металлоприёмник; 8 – расплав; 9 – электромагнитные системы

Другое научное направление ФТИМС НАН Украины в области магнитной гидродинамики не связано с магнитодинамическими установками. Оно относится к разработке электромагнитного перемешивателя нового типа, предназначенного для применения в отражательных печах, и основано на применении пульсирующего магнитного поля. Работы проводились вопреки тому, что электромагнитные перемешиватели бегущего магнитного поля уже более 20-ти лет успешно используют для плавки и приготовления алюминиевых сплавов. Однако, несмотря на неоспоримые достоинства, они имеют ограниченное применение из-за высокой стоимости. Цены на устройства бокового и донного расположения составляют соответственно около 150 и 500 тысяч долларов. В связи с этим обстоятельством была поставлена задача создать электромагнитный перемешиватель бокового расположения, не уступающий по эффективности известным, но имеющий стоимость в 2–3 раза ниже. К настоящему времени разработан экспериментальный образец такого перемешивателя, который испытали при перемешивании ванны вместимостью 300 кг алюминиевого сплава по схеме (рис. 4).

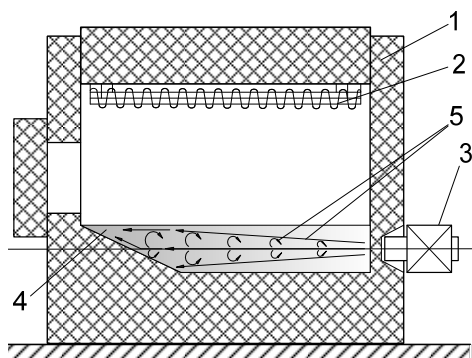


Рис. 4. Схема применения электромагнитного перемешивателя пульсирующего магнитного поля в отражательной печи:

1 – корпус отражательной печи; 2 – нагревательные элементы; 3 – электромагнитный перемешиватель пульсирующего магнитного поля; 4 – жидкий металл; 5 – горизонтальная затопленная струя, создаваемая перемешивателем

Частота пульсаций магнитного поля равна удвоенной частоте питающего напряжения, то есть 100 Гц, так как и положительная и отрицательная полуволны синусоидального переменного тока создают одинаковые по величине и направлению импульсы силы в жидком металле. Исследование поля скоростей и физическое моделирование показали, что под уровнем

расплава образуется под действием электромагнитных сил горизонтальная затопленная струя со скоростью в ядре потока около 1 м/с и дальностью действия не менее 2-х метров. В то же время известные перемешиватели бегущего магнитного поля бокового расположения создают поток, направленный вдоль стенки печи, поэтому в жидкометаллической ванне возникает круговое движение расплава. При этом для интенсификации перемешивания по вертикали применяют специальные вставки с каналами, располагаемые на боковой стенке печи напротив индуктора, создающего бегущее магнитное поле. Перемешиватель пульсирующего магнитного поля обеспечивает рациональную гидродинамическую ситуацию в объеме жидкометаллической ванны без применения дополнительных приспособлений.

ВЫВОДЫ

Использование электромагнитных сил при рафинировании алюминиевых сплавов продувкой аргона и фильтрованием является новым и перспективным направлением.

Замена в литье под низким давлением газового давления электромагнитным обеспечивает преимущества, связанные с повышением качества отливок и экономией металла, особенно в процессе, сочетающем заливку под электромагнитным давлением с принципом расщепления литниково-питающей системы.

Лабораторные исследования показали, что электромагнитный перемешиватель пульсирующего магнитного поля для отражательных печей может быть конкурентоспособной альтернативой электромагнитному перемешивателю бегущего магнитного поля.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jungblut G. Einbau einer elektromagnetischen Sitenkanalpumpe in einen bestehenden 25 Tonnen-Schmelzofen / G. Jungblut, Rheinfeld, F. Niedermair // *Aluminium*. – 2003. – 1/2. – С. 70–71.
2. Don Randal. Cosworth Process: Low-Turbulence way to Cast High Integrity Aluminium / Don Randal // *Modern Casting*. – 1987. – No 3. – P. 124–123.
3. Магнитодинамические насосы для жидких металлов / Полищук В. П., Цин М. Р., Горн Р. К. [и др.]. – Киев : Наук. думка, 1989. – 256 с.
4. Разработка электромагнитного перемешивателя пульсирующего магнитного поля для плавки алюминиевых сплавов в отражательных печах большой вместимости / В. И. Дубоделов, В. Н. Фикссен, Н. А. Слажнев, А. О. Горшков // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії* : зб. наук. праць. – Краматорск : ДДМА, 2010. – № 3(20). – С. 93–98.
5. Maniruzaman M., Maklouf M. // *Met. and Mater. Trans.* – 2002. – 33, N 2. – P. 297–314.
6. Фогель В. Обработка расплава для получения качественных алюминиевых отливок / В. Фогель // *Металлургия машиностроения*. – 2007. – № 2. – С. 13–15.
7. Пат. № 90327 Україна. Спосіб рафінування розплавів фільтруванням / Дубодєлов В. І., Фікссен В. М., Слажнев М. А. и др.; завник та патентовласник Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України. – № а200801711; заявл. 11.02.2008; опубл. 26.04.2010, Бюл. № 8.
8. Бояревич В. В. Электровихревые течения / В. В. Бояревич, Я. Ж. Фрейберг, Е. И. Шилова; под. ред. Э. В. Щербинина. – Рига : Зинатне, 1985. – 315 с.
9. In-line Degassing Treatment of A356 Alloy using the Electromagnetic Melt Transferring Pump / Jong-Moo Lee, Hyun-Suk Sim, V. Dubodelov, V. Fixsen and M. Slazhniev // *Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys, September 5–9, 2010. – Yokohama, Japan; the Japan Institute of Light Metals*.
10. Фикссен В. Н. Особенности литья под электромагнитным и газовым регулируемым давлением / В. Н. Фикссен, В. П. Полищук // *Литейное производство*. – 1989. – № 8. – С. 18–19.
11. Получение отливок из алюминиевых сплавов с использованием электромагнитного давления / Фикссен В. Н., Дубоделов В. И., Котлярский Ф. М. и др. // *Процессы литья*. – 1996. – № 4. – С. 64–72.
12. Фикссен В. Н. Тенденция к применению электромагнитных насосов для литья алюминиевых сплавов под низким регулируемым давлением / В. Н. Фикссен // *Металл и литье Украины*, 2004. – № 1–2. – С. 27–30.
13. Fixsen W. Elektromagnetisches Niederdruckgiessen von Al-Legierungen / W. Fixsen, L. Ohm, V. Trefnjak // *GIESSEREI*. – 2007. – № 2. – P. 64–65.
14. Fixsen W. Electro-magnetic low-pressure casting of Al alloys // W. Fixsen, L. Ohm, V. Trefnjak // *Casting Plant & Technology International*. – 2007. – № 2. – P. 38–39.