

УДК 621.74.04

Боякова Т.А., Снитко И.С., Авдулов А.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОГО ОБРАЗЦА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОДИФИКАТОРА НА СТРУКТУРУ АЛЮМИНИЕВОГО СЛИТКА В ПРОЦЕССЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В РОТОРНОЙ ЛИТЕЙНОЙ МАШИНЕ

Аннотация. В работе приведены исследования влияния опытно-промышленного образца электромагнитного модификатора на структуру алюминиевого слитка. Исследования проводились на роторной литейной машине литейно-прокатного агрегата, предназначенного для изготовления алюминиевой катанки. В рамках НИОКР были проведены испытания опытной установки электромагнитного модификатора на ЛА №3 ЛО №1 филиала ОАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехов. В процессе работы агрегата на номинальной скорости литья были отобраны 6 образцов литой заготовки и 6 образцов катанки, полученные при различных режимах работы опытной установки. При проведении металловедческих исследований образцов установлено влияние электромагнитного воздействия на модифицирование непрерывнолитых заготовок из алюминиевого сплава А5Е. Наибольшая степень модифицирования наблюдалась при $I = 42 \text{ А}$, $f = 40 \text{ Гц}$. Результаты выполнения НИОКР подтвердили возможность измельчения кристаллического строения непрерывнолитой заготовки, отливаемой в роторной машине путем воздействия электромагнитным полем, что существенно улучшает качество алюминиевой катанки и приводит к значительному уменьшению брака изготавливаемых из катанки проводов.

Ключевые слова: алюминиевая катанка, модифицирование, электромагнитное воздействие, магнитная гидродинамика, кристаллизация

Введение

Широкое распространение в электротехнической промышленности нашли провода, изготавливаемые из алюминия, в связи со своей низкой стоимостью и высокой электропроводностью. Из алюминия также изготавливаются жилы кабелей, применяемых для передачи электроэнергии от источников к потребителям. Отечественные предприятия в соответствии с государственными стандартами изготавливают токопроводящие жилы из алюминиевых сплавов марок А5Е, А7Е и АВЕ [1]. Провода изготавливают из алюминиевой катанки путем многократного волочения. Катанка является продуктом совмещенного процесса литья непрерывнолитой заготовки и ее прокатки на многоклетевом стане.

Установки непрерывного литья и прокатки [2] являются основными для производства алюминиевой катанки. Механические свойства катанки напрямую зависят от химического состава и кристаллической структуры алюминиевого сплава. В связи с особенностями процесса прокатки заготовки кристаллическая структура катанки повторяет структуру непрерывно литого слитка, полученного на промышленной роторной литейной машине. Отлитые заготовки в процессе кристаллизации имеют столбчатую неоднородную макроструктуру. Такая макроструктура слитка при прокатке или волочении приводит к повышенному трещинообразованию и, как следствие, браку продукции.

В настоящее время для измельчения зерна (модифицирования структуры) используются следующие средства: добавление в расплав модификаторов системы Al-Ti-B, воздействие на кристаллизующийся расплав ультразвуком [3], воздействие на расплав бегущим или импульсным магнитным полем [4, 5].

Каждый из методов имеет свои недостатки: введение модификаторов ведет к повышению электросопротивления и стоимости сплава [6]; ультразвуковое воздействие требует помещения излучателя в расплав в области кристаллизации, что часто конструктивно невозможно выполнить, а также из-за контакта излучателя с расплавом происходит быстрый выход его из строя [7]. Перемешивание жидкой сердцевины слитка электромагнитным полем в процессе кристаллизации в роторной литейной машине ранее не применялось.

Экспериментальные исследования

Металлургами была поставлена задача разработать устройство, позволяющее изменить макроструктуру слитка со столбчатой на мелкозернистую, что позволило бы улучшить его качество и значительно уменьшить количество брака. Для реализации поставленной задачи был разработан электромагнитный модификатор, который устанавливается непосредственно на литейную машину. Работа электромагнитного модификатора приводит к образованию магнитогидродинамических течений в расплаве, которые влияют на динамику процесса кристаллизации и нарушают рост столбчатых кристаллов [8].

Современные средства математического моделирования не позволяют проводить анализ процесса кристаллизации слитка в роторной литейной машине с электромагнитным воздействием, где результатом моделирования была бы кристаллическая структура слитка с высокой степенью достоверности. Также в металлургической промышленности новые решения внедряются только после их всесторонней апробации и испытаний, в результате которых подтверждается их работоспособность, надежность и технологичность. Исходя из этого, в рамках НИОКР был изготовлен опытно-промышленный образец модификатора и проведены его испытания на промышленной ро-

торной литейной машине агрегата ЛПА-АК конструкции ВНИИМЕТМАШ, расположенного в ЛО №1 Филиала ОАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехов (бывший Иркутский алюминиевый завод).

В рамках НИОКР была произведена отработка режимов работы модификатора, исследование и анализ структуры слитков из алюминиевых сплавов.

Электромагнитный модификатор, разработанный для работы на промышленном роторном кристаллизаторе литейно-прокатного агрегата по производству алюминиевой катанки типа ЛПА-АК конструкции ВНИИМЕТМАШ показан на рис. 1.



Рис. 1. Смонтированный на стане индуктор электромагнитного модификатора

Комплекс для электромагнитного модифицирования состоит из следующих основных элементов: индуктора, вентилятора с гибким воздуховодом, силового шкафа и пульта управления. Также в состав комплекса входят система крепления индуктора на кристаллизаторе, силовые кабели и кабели системы контроля и управления.

В рамках НИОКР были проведены холодные и горячие испытания электромагнитного модификатора. В ходе проведения холодных испытаний была осуществлена:

1. Пробная подача питания на индуктор модификатора на холодном кристаллизаторе. Магнитогидродинамический (МГД) модификатор показал стабильную работу.

2. Произведены смены режимов работы модификатора, изменялись частота и величина тока в индукторе. На всех параметрах комплекс показал стабильную работу.

3. С помощью алюминиевой пластины, помещённой в пространство между индуктором и кристаллизатором, было установлено, что направление бегущего электромагнитного поля совпадает с направлением вращения кристаллизатора, что и требуется для правильной работы комплекса.

После выхода агрегата на стабильный процесс литья и производства алюминиевой катанки были начаты испытания МГД-модификатора. Включение комплекса на минимальной мощности с последую-

щим выходом на максимальную мощность в процессе литья, не привело к образованию поверхностных дефектов и не повлияло на стабильность технологического процесса.

Комплекс показал возможность длительной эксплуатации на токе 60 А при существующей системе воздушного охлаждения индуктора. В индукторе был установлен стабильный тепловой режим с максимальной температурой обмотки 94°C.

В процессе работы агрегата на номинальной скорости литья были отобраны 6 образцов литой заготовки и 6 образцов катанки, полученных при следующих параметрах работы МГД-модификатора:

- образец №1 $I = 75$ А, $f = 25$ Гц;
- образец №2 $I = 52$ А, $f = 35$ Гц;
- образец №3 $I = 42$ А, $f = 40$ Гц;
- образец №4 $I = 72$ А, $f = 15$ Гц;
- образец №5 $I = 60$ А, $f = 25$ Гц;
- образец №6 без работы МГД-модификатора.

Была исследована макроструктура образцов от непрерывнолитых заготовок в поперечном и продольном направлениях после травления в реактиве для выявления зерна.

Исследована микроструктура литых заготовок с помощью оптического микроскопа «Neophot 21» с компьютерной системой регистрации и обработки изображений при увеличении 200 крат.

Исследована микроструктура катанки после нанесения анодной пленки для выявления зерна. Съёмка образцов при увеличении 50 крат производилась в поляризованном свете.

Макроструктура в сечении литой заготовки без МГД-воздействия состоит из полностью столбчатых кристаллов, направленных в разные стороны от центра слитка к стенкам кристаллизатора (рис. 2, образец №6).

По длине слитка макроструктура имеет более сложное строение, где по одну сторону от центра слитка имеет место столбчатая структура, а по другую – непосредственно от стенки кристаллизатора на глубине 15 мм наблюдаются столбчатые кристаллы, а далее к центру слитка достаточно крупные равноосные зерна с перемежающимися, отдельными узорчатыми кристаллами. Все это свидетельствует о том, что макроструктура слитка неоднородная и условия кристаллизации расплава были неодинаковые по разные стороны от центра слитка.

Результаты анализа макроструктуры поперечного и долевого сечения литых заготовок при воздействии магнитогидродинамических сил показали, что она изменяется в зависимости от тока (интенсивности электромагнитного поля) и его частоты (напряженности магнитного поля). С понижением тока от 72 до 42 А и одновременно повышением его частоты от 15 до 40 Гц происходит измельчение макрозерна (рис. 2, образцы №1-5).



Рис. 2. Структуры литых заготовок

Как видно из приведенных макроструктур, эпицентр воздействия электромагнитных сил находится ближе к центру слитка – в этой зоне наблюдается максимальное измельчение макрзерна.

Электромагнитное модифицирование позволяет измельчить размер зерна в заготовке до аналогичного размера в сравнении с классическим способом модифицирования структуры, используя модификатор ALTiB (рис. 3). При этом из-за особенности электромагнитного воздействия зерно имеет более равноосную форму по сравнению с модификатором ALTiB. В перспективе электромагнитное модифицирование может, как исключить использование ALTiB, так и улучшить его эффект

при их совместном использовании.

Проводились исследования микроструктуры катанки без МГД-воздействия и с МГД-воздействием (рис. 4). На микрошлифе зерна различаются из-за повышенной травимости их границ и из-за разницы в их ориентировках. Особенно контрастно различаются по-разному ориентированные зерна при наблюдении в поляризованном свете микрошлифа с прозрачной анодной пленкой. Следует отметить, что даже при таком методе выявление индивидуальных зерен бывает затруднительным, что и следует из результатов исследования микроструктуры катанки после нанесения анодной пленки.



Рис. 3. Макроструктуры литых заготовок:

а – с электромагнитным модифицированием (литейная машина конструкции ВНИИМЕТМАШ);
б– модифицированная Al-Ti-B (литейная машина конструкции Properzi)

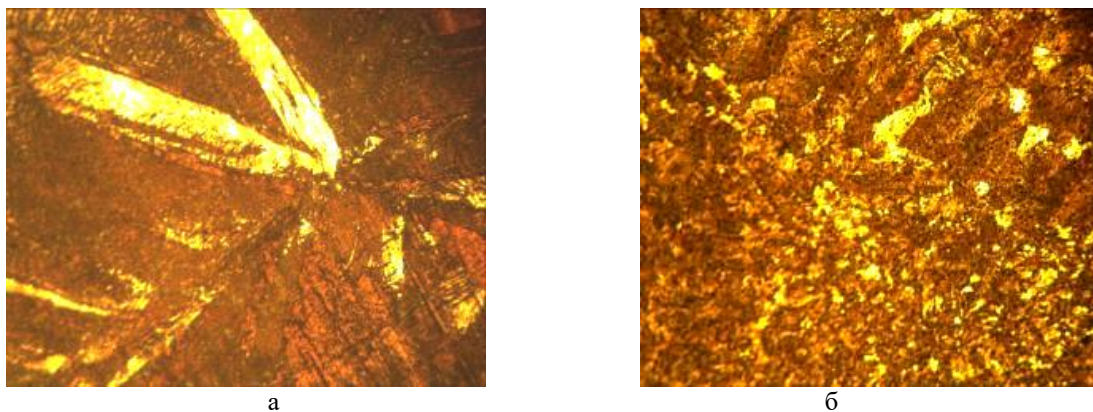


Рис. 4. Микроструктура образцов катанки:
а – без МГД-воздействия; б – с МГД-воздействием при $I = 42$ А, $f = 40$ Гц

Результаты исследования

В результате выполнения металловедческих исследований можно сделать следующие выводы:

1. Установлено влияние МГД-воздействия на модифицирование непрерывнолитых заготовок из алюминия А5Е, полученных на агрегате непрерывного литья и прокатки катанки в г. Шелехов. При этом 100% модифицирования заготовок не достигнуто.

2. Параметры МГД-воздействия, при которых имеет место наибольшая степень модифицирования литых заготовок, следующие: $I = 42$ А, $f = 40$ Гц.

3. Результаты микроструктурного анализа слитков, полученных без и с МГД-воздействием, показали отсутствие оксидных включений.

4. Для обеспечения 100%-го модифицирования литых заготовок рекомендуется сместить расположение индуктора электромагнитного модификатора ближе к зоне заливки расплава в кристаллизатор.

5. Для увеличения степени измельчения зерна рекомендуется провести эксперименты по дальнейшему совершенствованию МГД-воздействия на расплав, в частности, в связи с полученными закономерностями увеличить частоту тока свыше 40 Гц и отлить образцы при разных величинах тока в индукторе (от 20 А и выше).

6. Необходимо исследовать влияние измельчения зерна в литой заготовке на технологические параметры и качество проволоки, получаемой в результате волочения катанки.

Заключение

Воздействие электромагнитным полем позволяет измельчить кристаллическое строение непрерывнолитой заготовки в роторной литейной машине. Рекомендуется использовать данную технологию и устройство на роторных литейных машинах, входящих в состав литейно-прокатных агрегатов для производства алюминиевой катанки. Прогнозируется, что использование данной технологии в промышленности поз-

волит повысить технологичность переработки катанки в проволоку путем волочения, а также обеспечит снижение объема брака продукции по структурным дефектам.

Список источников

1. Горбунов Ю.А. Некоторые аспекты развития алюминиевых сплавов для проводников тока и припоев // Цветные металлы-2012: сб. науч. ст. 2012. С. 828-833.
2. Специальные способы литья: справочник / В.А. Ефимов, В.Н. Бабич, Г.А. Анисович и др. М.: Машиностроение, 1991. 436 с.
3. Эскин Г.И. Ультразвуковая обработка расплавленного алюминия: справ. изд-е. М.: Металлургия, 1988. 232 с. 1. CONTINUUS-PROPERZI S.P.A. [Электронный ресурс] / корпоративный сайт, 2016. Режим доступа: <http://www.properzi.com>, свободный.
4. Повх И.Л., Капуста А.Б., Чекин Б.В. Магнитная гидродинамика в металлургии. М.: Металлургия, 1974. 240 с.
5. Самойлович Ю.А. Кристаллизация слитка в электромагнитном поле. М.: Металлургия, 1986. 168 с.
6. Чеботарев В.А. Разработка и исследование кристаллизатора роторного типа для непрерывного литья полос из цветных металлов [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Чеботарев Владимир Абрамович; ВНИИМЕТМАШ. М., 1970. 26 с.
7. Формирование структуры и свойств алюминиевых слитков в условиях магнитогидродинамического воздействия / С.Ю. Хрипченко, И.В. Колесниченко, В.М. Долгих, Л.В. Никулин, С.А. Денисов // Цветные металлы. 2013. №4. С. 70-73.
8. Effect of electromagnetic field on microstructure and macrosegregation of flat ingot of 2524 aluminium alloy / Yu-bo Zuo, Jian-Zhong Cui, Dan Mou, Qing-feng Zhu, Xiang-jie Wang, Lei Li // Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 2, 132-134.

Сведения об авторах

Боякова Татьяна Алексеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия. E-mail: boyakova_ta@mail.ru.

Снитко Ирина Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия. E-mail: irant-kin@yandex.ru.

Авдулов Антон Андреевич – кандидат технических наук, заместитель директора дирекции развития нефтегазохимических производств АНЦ «Инновационный инжиниринговый центр», Москва, Россия. E-mail: Avdulov@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ISSUE OF INFLUENCE ON A PILOT MODEL OF AN ELECTROMAGNETIC MODIFIER ON THE STRUCTURE OF AN ALUMINUM INGOT DURING CRYSTALLIZATION IN A ROTARY CASTING MACHINE

Boyakova Tatyana A. – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Industrial Electronics, Bauman Moscow University, Russia.

Snitko Irina S. – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Industrial Electronics, Bauman Moscow University, Russia.

Avdulov Anton A. – PhD (Technical Sciences), Deputy Director of the Directorate of Development of Petrochemical Productions of the ANC "Innovative Engineering Center", Russia.

Annotation. The paper presents studies the influence of a pilot-industrial sample of an electromagnetic modifier on the structure of an aluminum ingot. The researches were carried out on a rotary casting machine, a casting and rolling unit designed for the manufacture of aluminum wire rod. As part of the R&D, tests were carried out on the experimental installation of an electromagnetic modifier at LA No. 3 of LO No. 1 of the RUSAL Bratsk branch in Shelekhov. There were selected 6 samples of cast billet and 6 samples of wire rod during the operation of the unit at the nominal casting speed, obtained under various operating modes of the pilot plant. During the metallographic studies of the samples, the influence of electromagnetic influence on the modification of continuously cast blanks made of aluminum alloy A5E was established. The most degree of modification was observed at $I=42\text{A}$, $f=40\text{ Hz}$. The results of R&D confirmed the possibility of grinding the crystalline structure of a continuously cast billet cast in a rotary machine by exposure to an electromagnetic field. This significantly improves the quality of the aluminum wire rod and leads to a significant reduction in the scrap of wires made from wire rod.

Keywords: aluminum wire rod, modification, electromagnetic effect, magnetic hydrodynamics, crystallization.

Ссылка на статью:

Боякова Т.А., Снитко И.С., Авдулов А.А. Исследование влияния опытно-промышленного образца электромагнитного модификатора на структуру алюминиевого слитка в процессе кристаллизации в роторной литейной машине // Теория и технология металлургического производства. 2025. №2(53). С. 25-29.

Boyakova T.A., Snitko I.S., Avdulov A.A. Issue of influence on a pilot model of an electromagnetic modifier on the structure of an aluminum ingot during crystallization in a rotary casting machine. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 53, no. 2, pp. 25-29.