

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2026-55-72-78>

АНАЛИЗ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КРИСТАЛЛИЗАТОР

Якубович Е.А.

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

Ключевые слова: непрерывное литье, слиток, алюминиевые сплавы, электромагнитный кристаллизатор, пусковой режим, кристаллизация, донная часть слитка, скорость литья, режим охлаждения.

Аннотация. В статье выполнен анализ особенностей и преимуществ способа непрерывного литья алюминиевых сплавов в электромагнитный кристаллизатор для получения слитков с целью последующего производства катаных и прессованных полуфабрикатов. Проанализированы особенности формирования донной части слитка на начальном этапе кристаллизации и установлены требования к скоростному режиму вытягивания слитка с целью исключения деформации, приводящей к проливу жидкого металла. Показана связь основных технологических параметров процесса, указывающая на необходимость учета взаимозависимости параметров охлаждения слитка и скорости литья при проектировании режимов литья. Рассмотрены возможности расширения сферы применения способа литья в электромагнитный кристаллизатор для получения слитков переменного сечения, а также методы повышения стабильности размеров слитка.

ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF CONTINUOUS CASTING PROCESS OF ALUMINUM ALLOYS INTO ELECTROMAGNETIC MOLD

Yakubovich E.A.

Samara state technical university, Samara, Russia

Keywords: continuous casting, ingot, aluminum alloys, electromagnetic crystallizer, starting mode, crystallization, bottom of the ingot, casting speed, cooling mode.

Abstract. This article analyzes the features and advantages of continuous casting of aluminum alloys in an electromagnetic crystallizer to produce ingots for the subsequent production of rolled and extruded semi-finished products. The characteristics of ingot bottom formation during the initial crystallization stage are analyzed, and requirements for the ingot drawing speed are established to prevent deformation that leads to liquid metal spillage. The relationship between the main process parameters is demonstrated, highlighting the need to consider the interdependence of ingot cooling parameters and casting speed when designing casting modes. The possibilities of expanding the scope of application of the method of casting in an electromagnetic crystallizer for producing ingots of variable cross-section, as well as methods for increasing the dimensional stability of the ingot, are considered.

Непрерывное литьё металлов и сплавов, процесс получения слитков и заготовок, основанный на равномерном перемещении металла относительно зон заливки и кристаллизации [1]. Этот метод занимает особое место в числе наиболее значимых металлургических технологий, обеспечивающих работу ключевых отраслей промышленности, в первую очередь металлургии и машиностроения. В современной металлургии доля непрерывного литья в общем объеме производства стали в мире очень высока и продолжает расти,

все слитки алюминиевых и магниевых сплавов, а также большая доля слитков тяжёлых цветных сплавов производится методом непрерывного литья. Наиболее распространено литьё в металлический кристаллизатор скольжения.

Процесс непрерывного литья характеризуется высоким уровнем сложности, глубокой спецификой, порождаемой разнообразием требований к конечной продукции, конструктивными особенностями применяемого оборудования, типоразмером получаемой заготовки, зависимостью от типа и свойств кристаллизующегося металла.

В настоящее время получен целый ряд фундаментальных научных результатов и решений актуальных прикладных задач, совокупность которых можно охарактеризовать как создание и существенное развитие теории и практики непрерывного литья, обеспечивающих устойчивое промышленное применение этого вида металлургической технологии.

Тенденции развития непрерывного литья металлов определяют ориентацию на углубленный поиск методов совершенствования технологических процессов с учетом характерных особенностей конкретных приложений с целью выхода на высокий уровень технического совершенства оборудования, обеспечения значимой технико-экономической эффективности и производительности технологических комплексов по производству непрерывнолитых заготовок.

Указанный круг задач представляет существенный научный интерес и отличается практической значимостью, а предлагаемые научно-обоснованные методы и способы их решения можно рассматривать как определенный вклад в развитие актуальных проблем металлургического производства.

Самостоятельный интерес представляет комплекс проблем, связанный с исследованием и реализацией процесса непрерывного литья алюминиевых сплавов, слитки которых широко применяются для производства различного рода прессованных полуфабрикатов [2]. В настоящее время свыше 90% (по массе) выпускаемых в мире профилей, панелей и других прессованных изделий изготавливают из слитков этих сплавов. При этом широкий спектр актуальных прикладных задач, связанный с практическим освоением непрерывного литья алюминиевых сплавов, как правило, не может быть решен «прямым» применением обобщенного формализма известных теоретических схем, технологических и конструктивных решений, характерных для непрерывного литья стали.

В настоящее время, начиная с основополагающих работ В.И. Добаткина, получен и обобщен достаточно большой опыт непрерывного литья слитков алюминиевых сплавов различных типоразмеров с использованием традиционных промышленных установок на базе кристаллизаторов скольжения [3, 4]. Сформулированы научные основы способа, изучены закономерности кристаллизации слитков, методы улучшения структуры и обеспечения качества слитков и полуфабрикатов, конструкции установок и кристаллизаторов и проектирования технологических режимов литья, экологические аспекты производства слитков.

Инновационный этап в развитии индустрии алюминиевых сплавов связан с созданием, развитием и промышленным освоением метода непрерывного литья слитков в электромагнитном поле, отличительной особенностью которого является замена контактного водоохлаждаемого кристаллизатора скольжения электромагнитным кристаллизатором (ЭМК), представляющим собой индукционный формирова́тель, пульсирующее электромагнитное поле которого создает силовое воздействие на жидкий металл, удерживающее его в заданном контуре [5]. Способ непрерывного литья алюминиевых сплавов в ЭМК широко апробирован в условиях реального производства применительно к ответственной технологии получения литых заготовок с целью с целью выпуска различных полуфабрикатов в процессе горячего прессования и прокатки.

Применение ЭМК явилось логическим следствием развития прогрессивных тенденций в технологии непрерывного литья, в частности, проникновения методов магнитной гидродинамики в литейное производство, интенсификации охлаждения, улучшения качества поверхности, повышения выхода годного металла при обработке слитков. Электромагнитное литье характеризуется рядом специфических качественных особенностей технологического и конструктивного свойства. Это приводит к представляющей самостоятельный интерес проблеме адаптации общетеоретических результатов, а также получения и использования базовых закономерностей этого способа непрерывного литья. В то же время широкий спектр имеющих принципиальные особенности актуальных прикладных задач производства слитков алюминиевых сплавов, как правило, не может быть решен прямым применением обобщенного формализма известных теоретических схем и практических решений, характерных для стальных слитков.

В главных своих аспектах указанные задачи могут быть решены на базе общей теории метода, охватывающей электродинамические, гидродинамические, теплофизические и металлургические процессы, протекающие в условиях электромагнитного воздействия на кристаллизующийся расплав. На этой основе выполнен ряд исследований и обобщений, подтверждающих значимые преимущества литья алюминиевых сплавов в ЭМК и служащих стимулом к его дальнейшему совершенствованию, расширению сферы его применения в металлургическом производстве изделий и полуфабрикатов [6-8].

Тем не менее, остаются открытыми важные вопросы, связанные с совершенствованием конструкций ЭМК, технологических режимов литья, оптимизацией конкретных параметров литья слитков различных сплавов и типоразмеров с целью обеспечения требуемого качества слитков с экстремальными значениями выбранного критерия эффективности процесса (выход годного, показатели структуры и свойств металла, экономическая обоснованность работы комплекса «печь – ЭМК», экологические аспекты), а также изучение возможностей применения рассматриваемой технологии для

получения заготовок малого сечения, длинномерных заготовок, слитков переменного сечения, создания технологии совмещенной технологии литья и прокатки.

Одной из принципиальных сложностей промышленного производства плоских слитков является формирование донной части слитка на пусковом нестационарном этапе работы установки с ЭМК. Отмеченное связано с неизбежной деформацией (короблением) донной части под действием формообразующих элементов инструментальной оснастки (ЭМК и затравки, на которую опирается слиток) образованием зазора между слитком и затравкой. Это приводит к нарушению устойчивости и возможности технологической остановки процесса вследствие проливов жидкого металла, снижению выхода годного за счет обрезки некондиционной донной части слитка.

Для устойчивого образования донной части применяют программное увеличение скорости вытягивания слитка до технологической с различным ускорением, значение которого корректируется в зависимости от типа сплава и типоразмера слитка [9]. Обоснованный выбор скоростного режима пускового этапа непрерывного литья плоских слитков алюминиевых сплавов в ЭМК обеспечивает уменьшение деформации донной части слитка и потерь на донную обрезь, снижение брака по трещинообразованию и проливам жидкого металла.

Необходимым этапом разработки технологии литья в ЭМК является анализ взаимосвязи основных параметров процесса (интенсивность охлаждения, скорость вытягивания слитка) и их влияния на закономерности затвердевания слитка. Результаты масштабных исследований и практические результаты по разработке методологии расчетов и проектирования технологических режимов литья слитков различных типоразмеров приведены в [10]. Полученные данные могут быть использованы для обоснования технологических требований и конструктивных решений систем охлаждения и регулирования подачи охладителя в направлении повышения энергоэффективности производственного комплекса с применением ЭМК.

Расширение технологических возможностей метода формирования слитков в электромагнитном поле предполагает совершенствование конструкций ЭМК. Известные конструкции ЭМК используют принцип однозначного соответствия размера поперечного сечения слитка и размера разливочной полости, образуемой индуктором ЭМК. Вместе с тем в современном производстве возникает необходимость получения слитков, профиль и поперечное сечение которых изменяются по заранее заданной программе. В этом случае ЭМК дополнительно оснащается секционным индуктором, расположенным ниже основного формообразующего контура, состоящим из соединенных между собой по скользящей посадке секций, с возможностью их перемещения. Такая конструкция позволяет отливать слитки, поперечное сечение которых определяется размерами поперечного сечения полости, задаваемой секционным индуктором.

Промышленное освоение литья плоских слитков в ЭМК выявило возможность искажения строго прямоугольной формы размеров поперечного сечения, достигающего 7% в центральной зоне слитка. Причиной этого является деформация и усадка широких граней при сохранении равномерного электромагнитного давления по периметру плоского слитка. Отмеченное затрудняет прокатку таких слитков, что снижает технико-экономические показатели способа литья в ЭМК.

Устранение недостатка достигается созданием неравномерного по периметру слитка электромагнитного давления, возрастающего по направлению от центра широкой грани к ребру слитка. В этом случае слой жидкого металла в области широкой грани имеет ширину, превосходящую ширину поперечного сечения твердого слитка. Происходящая в этих условиях кристаллизация и деформация обеспечивает формирование готового слитка со строго параллельными гранями.

Неравномерное электромагнитное давления вдоль широкой грани слитка создают, например, созданием неравномерного воздушного зазора между индуктором и поверхностью слитка путем придания выпуклости широким граням индуктора, а также путем нанесения на поверхность индуктора, обращенную к слитку, слоя ферромагнитного материала переменной по периметру слитка толщины. Создание зоны минимального электромагнитного давления в центре широкой грани обеспечивает сохранение заданной формы и размеров поперечного сечения слитка.

Рассмотренные вопросы не исчерпывают всего разнообразия возможных направлений совершенствования технологических проблем и расширения области применения способа непрерывного литья в ЭМК в производстве слитков алюминиевых сплавов. Результаты работ [11-13] указывают на возможность применения этой технологии для создания эффективных металлургических комплексов с целью получения заготовок малого диаметра, проволоки, а также совмещенных процессов непрерывного литья и прессования.

Список литературы

1. Бровман М.Я. Непрерывная разливка металлов. – М.: Экомет, 2007. – 484 с.
2. Ливанов В.А., Габидуллин Р.М., Шипилов Н.С. Непрерывное литье алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия. 1977. – 168 с.
3. Черепок Г.В. Исследование процесса кристаллизации и разработка промышленной технологии производства крупногабаритных слитков прямоугольного сечения: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М., 1971. – 26 с.
4. Напалков В.И., Черепок Г.В., Махов С.В., Черновол Ю.М. Непрерывное литье алюминиевых сплавов. Справочник. – М.: Интермет-Инжиниринг, 2005. – 512 с.
5. Гецелев З.Н., Балахонцев Г.А., Квасов Ф.И., Черепок Г.В., Варга И.И., Мартынов Г.И. Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор. – М.: Металлургия, 1983. – 152 с.

6. Квасов Ф.И., Гецелев З.Н., Балахонцев Г.А., Черепок Г.В., Яковлев В.И. Непрерывное литье слитков из алюминия и его сплавов в электромагнитные кристаллизаторы // Цветные металлы. – 1974. – №2. – С. 50-53.
7. Добаткин В.И. Опыт внедрения непрерывного литья слитков в электромагнитный кристаллизатор // Цветные металлы. – 1980. – №2. – С. 54-58.
8. Ливанов В.А., Шипилов В.С. Некоторые особенности процесса затвердевания слитков, отливаемых непрерывным методом в ЭМК // Цветные металлы. – 1980. – №2. – С. 66-69.
9. Якубович Е.А. Совершенствование инструментальной оснастки для непрерывного литья слитков из алюминиевых сплавов в электромагнитный кристаллизатор // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2022. – №32. – С. 70-73.
10. Якубович Е.А. Взаимосвязь технологических параметров непрерывного литья слитков алюминиевых сплавов в электромагнитный кристаллизатор // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2023. – №34. – С. 41-45.
11. Первухин М.В. Электротехнология и оборудование для получения непрерывнолитых слитков в электромагнитном кристаллизаторе. Теория и практика: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – Красноярск, 2012. – 35 с.
12. Авдулов А.А., Усынина Г.П., Сергеев Н.В., Гудков И.С. Технология литья алюминиевых сплавов в электромагнитный кристаллизатор для производства заготовок малого диаметра // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. – 2017. – Т. 10, №1. – С.82-98.
13. Авдулов А.А., Сергеев Н.В., Гудков И.С., Тимофеев В.Н., Горохов Ю.В., Авдулова Ю.С. Разработка технологии производства проволоки из специальных алюминиевых сплавов на основе способа литья в электромагнитный кристаллизатор и непрерывного прессования способом конформ // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2017. – Т. 10, №1. – С.85-94.

References

1. Brovman M.Ya. Continuous Casting of Metals. – М.: Ekomet, 2007. – 484 p.
2. Livanov V.A., Gabidullin R.M., Shipilov N.S. Continuous Casting of Aluminum Alloys. – М.: Metallurgy, 1977. – 168 p.
3. Cherepok G.V. Study of the Crystallization Process and Development of Industrial Technology for the Production of Large-Size Rectangular Ingots: Abstract of the diss. ... cand. of tech. sc. – М., 1971. – 26 p.
4. Napalkov V.I., Cherepok G.V., Makhov S.V., Chernovol Yu.M. Continuous Casting of Aluminum Alloys. Handbook. – М.: Intermet-Inzhenering, 2005. – 512 p.
5. Getselev Z.N., Balakhontsev G.A., Kvasov F.I., Cherepok G.V., Varga I.I., Martynov G.I. Continuous Casting in an Electromagnetic Crystallizer. – М.: Metallurgy, 1983. – 152 p.
6. Kvasov F.I., Getselev Z.N., Balakhontsev G.A., Cherepok G.V., Yakovlev V.I. Continuous Casting of Aluminum and Its Alloy Ingots in Electromagnetic Crystallizers // Non-Ferrous Metals. 1974, no. 2, pp. 50-53.
7. Dobatkin V.I. Experience in Implementing Continuous Casting of Ingots in an Electromagnetic Crystallizer // Non-Ferrous Metals. 1980, no. 2, pp. 54-58.

8. Livanov V.A., Shipilov V.S. Some Features of the Solidification Process of Ingots Cast by the Continuous Method in an Electromagnetic Crystallizer // Non-Ferrous Metals. 1980, no. 2, pp. 66-69.
9. Yakubovich E.A. Improvement of Tooling for Continuous Casting of Aluminum Alloy Ingots in an Electromagnetic Crystallizer // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2022, iss. 32, pp. 70-73.
10. Yakubovich E.A. Interrelationship of Technological Parameters of Continuous Casting of Aluminum Alloy Ingots in an Electromagnetic Crystallizer // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2023, iss. 34, pp. 41-45.
11. Pervukhin M.V. Electrical Technology and Equipment for Producing Continuously Cast Ingots in an Electromagnetic Crystallizer. Theory and Practice: Abstract of the diss. ... doct. of tech. sc.– Krasnoyarsk, 2012. – 35 p.
12. Avdolov A.A., Usynina G.P., Sergeev N.V., Gudkov I.S. Technology of Casting Aluminum Alloys in an Electromagnetic Crystallizer for the Production of Small-Diameter Billets // Journal of the Siberian Federal University. Series: Chemistry. 2017, vol. 10, no. 11, pp. 82-98.
13. Avdolov A.A., Sergeev N.V., Gudkov I.S., Timofeev V.N., Gorokhov Yu.V., Avdulova Yu.S. Development of a technology for producing wire from special aluminum alloys based on casting in an electromagnetic crystallizer and continuous pressing by the conform method // Journal of the Siberian Federal University. Series: Engineering and Technology. 2017, vol. 10, no. 1, pp. 85-94.

Якубович Ефим Абрамович – кандидат технических наук, профессор кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы»	Yakubovich Efim Abramovich – candidate of technical science, professor of Department «Metal science, powder metallurgy, nanomaterials»
eyakubovich@mail.ru	

Received 21.08.2026