

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МГД-УСТРОЙСТВА В РОТОРНОЙ ЛИТЕЙНОЙ МАШИНЕ АГРЕГАТА ЛПА-АК ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СТРУКТУРЫ СЛИТКА ИЗ СПЛАВА АЛЮМИНИЯ А5Е

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос влияния электромагнитного модифицирования на макроструктуру и микроструктуру сплава алюминия марки А5Е. Без модифицирования в процессе кристаллизации в роторной литейной машине структура слитка неоднородная и в процессе прокатки или волочения приводит к появлению трещин и большому браку продукции. Установка электромагнитного модификатора, магнетогидродинамического (МГД) устройства непосредственно на литейную машину позволяет при кристаллизации значительно улучшить макроструктуру слитка и прутка из алюминия А5Е. Структура металла измельчается и становится более однородной. Контроль за эффективностью модифицирования оценивался по изменению размера зерна, формы и однородности структуры сплава путем металлографических исследований. Исследования разработанного устройства проводились на промышленной роторной литейной машине литейно-прокатного агрегата, предназначенного для изготовления алюминиевой катанки с установленным опытным образом электромагнитного модификатора структуры алюминиевого слитка в рамках НИОКР. В работе использовались образцы от литых заготовок и катанки, полученные при разных параметрах тока и частоты электромагнитного модификатора. Для исследования микроструктуры использовался оптический микроскоп «Neophot 21». Результаты выполнения НИОКР подтвердили возможность измельчения кристаллического строения непрерывнолитой заготовки, отливаемой в роторной литейной машине путем воздействия электромагнитным полем. При сравнении механических свойств различных образцов катанки установлено, что более пластичны изделия, имеющие однородное, мелкозернистое строение. Прогнозируется, что использование данной технологии в промышленности позволит повысить технологичность переработки катанки в проволоку путем волочения, а также обеспечит снижение объема брака продукции по структурным дефектам.

Ключевые слова: литейное производство, индукционная установка, электромагнитное модифицирование, сплавы, кристаллизация, макроструктуры, микроструктуры, литая заготовка, катанка

Введение

В последние годы широкое применение благодаря уникальному набору свойств нашел сплав алюминия А5Е. Выбор этого сплава оправдан, когда нужна максимальная пластичность, высокая коррозионная стойкость и низкая стоимость. Основная сфера применения алюминия А5Е – это производство электрических проводников различного назначения. Особенно это важно для ЛЭП (линии электропередач) большой протяженности. Алюминиевые провода выигрывают у медных в ЛЭП за счет оптимального сочетания цены, веса и достаточной проводимости [1].

Для изготовления алюминиевых проводов очень часто используется катанка на основе сплава А5Е. Катанка является продуктом совмещенного процесса литья непрерывнолитой заготовки и ее прокатки. Механические свойства катанки зависят от химического состава и кристаллической структуры алюминиевого сплава. При этом кристаллическая структура катанки повторяет структуру непрерывнолитой заготовки, полученной на промышленной роторной литейной машине. При кристаллизации отлитых заготовок они имеют крупнозернистую, столбчатую и неоднородную макроструктуру. Такая макроструктура слитка при прокатке или волочении приводит к появлению трещин и, как следствие, к браку продукции [2, 3].

Для улучшения структуры сплава алюминия используется модифицирование. Модифицирование – это процесс искусственного изменения структуры сплава, заключающийся в уменьшении размеров зерна, а также изменении формы, размера и распределе-

ния структурных составляющих сплава. В результате модифицирования улучшаются эксплуатационные свойства сплава, в частности повышается технологическая пластичность и однородность механических свойств [4].

Для модифицирования сплава А5Е в настоящее время используется легирование расплава путем введения в расплав основного металла прутковой легатуры Al-Ti-B. Использование этого способа модифицирования улучшает структуру сплава, но приводит к значительному удорожанию продукции. Данная технология модифицирования требует усовершенствования.

Методы исследования

Чтобы уменьшить количество брака продукции и снизить затраты, ОАО «РУСАЛ» была поставлена задача разработать технологическое устройство, позволяющее изменить макроструктуру слитка, сделать ее мелкозернистой. Для реализации поставленной задачи была разработана индукционная установка (электромагнитный модификатор) для воздействия на жидкую фазу в процессе кристаллизации, которая устанавливается непосредственно на роторную литейную машину (рис. 1). При электромагнитном воздействии в расплаве образуются МГД-течения, которые влияют на динамику процесса кристаллизации и нарушают рост столбчатых кристаллов за счет роста теплопередачи через фронт кристаллизации [5-7]. Ранее этот метод для модифицирования в роторной литейной машине не применялся [8].

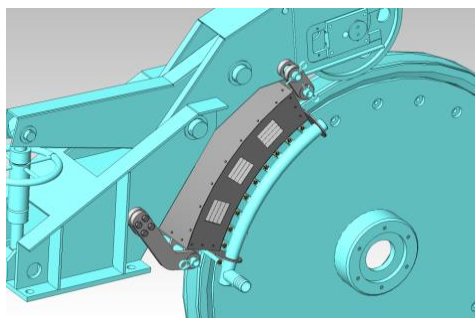


Рис. 1. Проект индуктора электромагнитного модификатора

По данной теме были проведены теоретические и экспериментальные исследования по определенным технологическим процессам в черной и части цветной металлургии. В настоящее время отсутствуют как аналитические методы оценки зерна в алюминиевой катанке с учетом реального химического состава сплава и применяемого модификатора, так и компьютерные модели процесса модифицирования при изготовлении катанки с учетом конструктивных и технологических параметров литья. Также в металлургической промышленности новые разработки внедряются только после апробации и испытаний. Исходя из этого, в рамках НИОКР был изготовлен опытно-промышленный образец модификатора и проведены его испытания на промышленной роторной литейной машине агрегата ЛПА-АК конструкции ВНИИМЕТМАШ, расположенного в ЛО филиала ОАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехов.

В процессе работы электромагнитного модифика-

тора были отобраны образцы литой заготовки и катанки, полученные при разных значениях тока и частоты: образец №1 – $I = 75$ А, $f = 25$ Гц; №2 – $I = 52$ А, $f = 35$ Гц; №3 – $I = 42$ А, $f = 40$ Гц; №4 – $I = 72$ А, $f = 15$ Гц; №5 – $I = 60$ А, $f = 25$ Гц; №6 – без МГД-модификатора.

Были проведены исследования макроструктуры образцов от непрерывнолитых заготовок в поперечном и продольном направлениях после травления в реактиве для выявления зерна. Макроструктура в сечении литой заготовки без электромагнитного воздействия состоит только из столбчатых кристаллов, направленных в разные стороны от центра слитка к стенкам кристаллизатора (рис. 2).

По длине слитка макроструктура имеет более сложное строение. По одну сторону от центра слитка структура столбчатая, а по другую непосредственно от стенки кристаллизатора на глубине 15 мм наблюдаются столбчатые кристаллы, а далее к центру крупные равноосные зерна с перемешивающимися отдельными узорчатыми кристаллами. В данном случае макроструктура слитка неоднородная и условия кристаллизации расплава неодинаковые по разные стороны от центра слитка. Такая структура слитка является неоднородной и в дальнейшем приводит к браку получаемой из нее продукции.

Результаты анализа макроструктуры поперечного и долевого сечения литых заготовок после электромагнитного воздействия на расплав при токе $I = 42$ А и частоте $f = 40$ Гц приведены на рис. 3.

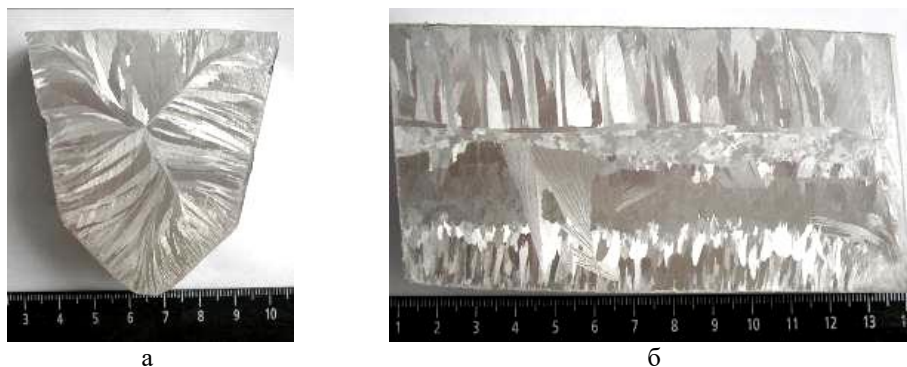


Рис. 2. Макроструктура слитка без электромагнитного воздействия: а – поперечное сечение; б – долевое сечение

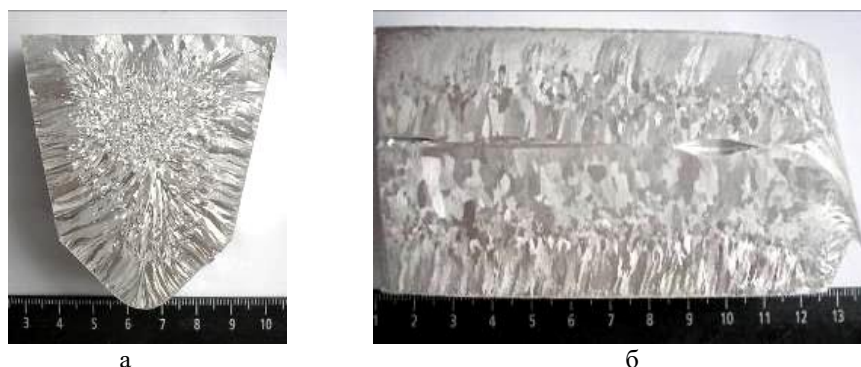


Рис. 3. Макроструктура слитка после электромагнитного воздействия: а – поперечное сечение; б – долевое сечение

Из приведенной макроструктуры видно, что эпицентр воздействия электромагнитных сил находится ближе к центру слитка. В этой зоне наблюдается измельчение макрозерна. По обе стороны от мелкозернистой структуры наблюдаются в основном столбчатые кристаллы. В центральной зоне литой заготовки на границе двух кристаллизующихся потоков металла видны газовые полости длиной 20 мм и диаметром до 4 мм, что связано с усадочными явлениями при кристаллизации металла. Деформированный металл плотнее и однороднее, чем литой. При горячей прокатке, которой в дальнейшем подвергается непрерывнолитая заготовка, усадочные поры должны завариться [9].

Таким образом, получены хорошие результаты от воздействия электромагнитного модификатора.

Также была исследована микроструктура катанки после нанесения анодной пленки для выявления зерна. Съемка образцов при увеличении в 50 крат проводилась в поляризованном свете. Результаты исследования микроструктуры литой заготовки показали, что в зоне с мелким зерном внутреннее строение было более грубым, нежели в зоне столбчатых кристаллов, и параметр дендритной ячейки составляет 32 и 64 мкм соответственно (рис. 4). Этот факт свидетельствует о том, что скорость охлаждения заготовки с более тонкой внутренней микроструктурой была выше, несмотря на то, что заготовка имела крупную столбчатую макроструктуру.

Анализ микроструктур слитков №6 и 3, полученных без и с МГД-воздействием, показал отсутствие оксидных включений. Это объясняется тем, что электромагнитное воздействие, вызывающее интенсивную циркуляцию расплава, происходит в жидкой сердцевине слитка, не имеющей контакта с окружающей средой. Таким образом, исключается возможность разрушения поверхностной оксидной пленки на зеркале расплава с последующим замешиванием ее в расплав.

Проводились исследования структуры катанки, полученной из непрерывнолитых заготовок с помощью оптического микроскопа «Neophot 21» с компьютерной системой регистрации и обработки изображений при увеличении в 200 крат при разных параметрах работы электромагнитного модификатора.

Структура деформированного полуфабриката формируется в результате двух процессов: постепенного преобразования исходной структуры и создания новых элементов структуры деформационного происхождения. Первый процесс состоит в изменении формы зерен в соответствии со схемой деформации в данной зоне сечения, а второй – в образовании новых границ зерен, где зерно – это область, окруженная более 10-15° и не содержащей таких границ внутри себя [1, 5]. В исходной литой заготовке это дендрит.

Форма зерен в изделии соответствует локальным схемам деформации. Так, в центре круглого прутка волокна имеют круглое сечение, а вблизи периферии – вытянутое по окружности прутка. Текстура и форма зерен тесно связаны, поскольку определяются схемой деформации [10].

Температура деформации влияет на микроструктуру следующим образом. При понижении температуры возрастает вероятность дробления зерен новыми высокоугловыми границами, а при повышении есть вероятность миграции исходных границ. Оба процесса уменьшают соответствие между начальной и конечной структурой [11].

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.

В целом структура поперечного сечения исследуемой катанки соответствует таковой, полученной на литых заготовках в зависимости от МГД-воздействия при токе $I = 42$ А и частоте $f = 40$ Гц (рис. 5).

Испытания на растяжение катанки с определением предела прочности, предела текучести и относительного удлинения проводились в универсальной испытательной машине «WDW-20» усилением 2 тонны.

Результаты испытаний механических свойств катанки (табл. 1) показали, что максимальные значения прочностных характеристик получены на образцах катанки №2 и 4, прокатанных из отливок, имеющих 30% степень модифицирования и отсутствие модифицирования соответственно.

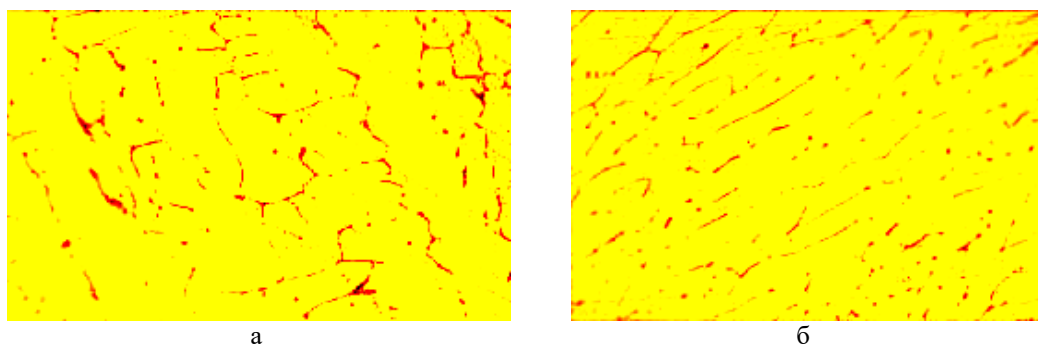


Рис. 4. Микроструктура литой заготовки:

а – в зоне мелкого макрозерна, $\times 200$; б – в зоне столбчатых кристаллов, $\times 200$

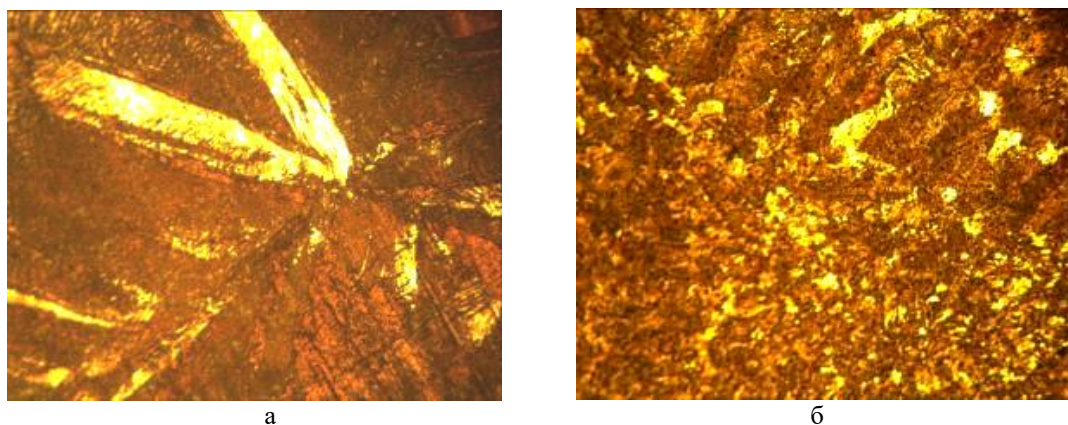


Рис. 5. Структура поперечного сечения катанки:
а – без МГД-воздействия; б – с МГД-воздействием при $I = 42 \text{ A}$ и $f = 40 \text{ Гц}$

Таблица 1

Механические свойства катанки $\varnothing 9,5 \text{ мм}$ из алюминия А5Е в зависимости от параметров МГД-модификатора при литье заготовок

Номер образца от катанки	Параметры МГД-воздействия, степень модифицирования литых заготовок	Механические свойства катанки			Марка катанки по ГОСТ 13843-78
		Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	
№1	$I = 75 \text{ A}$, $f = 25 \text{ Гц}$; модифицирование отсутствует	95	75	31,4	ПТ
		100	85	28,5	
№2	$I = 52 \text{ A}$, $f = 35 \text{ Гц}$; 30%-я степень модифицирования	110	92	28,4	Т3
		111	98	30,8	
№3	$I = 42 \text{ A}$, $f = 40 \text{ Гц}$; 40%-я степень модифицирования	106	91	31,2	Т2
		108	86	30,1	
№4	$I = 72 \text{ A}$, $f = 15 \text{ Гц}$; модифицирование отсутствует	116	109	28,2	Т3
		116	108	23,4	
№5	$I = 60 \text{ A}$, $f = 25 \text{ Гц}$; модифицирование отсутствует	103	88	29,3	Т1
		101	76	30,2	
№6	Без МГД-воздействия, модифицирование отсутствует	108	92	28,2	Т2
		105	85	27,2	

Заключение

Проведено исследование работы опытной МГД-установки для электромагнитного модифицирования структуры алюминиевого слитка на промышленной роторной литейной машине агрегата ЛПА-АК. Исследованы структуры и физико-механические свойства непрерывнолитых заготовок и катанки, полученных при электромагнитном воздействии в процессе кристаллизации.

В процессе работы агрегата на номинальной скорости литья были отобраны 6 образцов литой заготовки и 6 образцов катанки, полученные при разных режимах работы опытной установки. В результате выполнения металловедческих исследований образцов установлено влияние электромагнитного воздействия на модифицирование непрерывнолитых заготовок из алюминия А5Е. При силе тока в индукторе электромагнитного модификатора $I = 42 \text{ A}$ и частоте $f = 40 \text{ Гц}$ получен наилучший эффект модифицирования структуры: мелкозернистая структура образовалась в 40% объема слитка по сравнению со слитком, отлитым без МГД-воздействия. Образцы катанки диаметром 9,5 мм

из сплава А5Е, изготовленные из слитков, отлитых с электромагнитным воздействием при сопоставимых значениях предела прочности и предела текучести (в среднем 107 и 88 МПа соответственно) имеют улучшенные пластические свойства. Получено в среднем на 6,8% большее значение относительного удлинения образцов при испытаниях на разрыв, чем у образцов катанки, отлитых без электромагнитного воздействия (29,6% против 27,7%), что потенциально позволит улучшить технологические свойства катанки при дальнейшей переработке. В частности, в процессе волочения будет обеспечена меньшая обрывность проволоки, что обеспечит снижение объема брака продукции по структурным дефектам.

Из результатов выполнения НИОКР следует, что технология электромагнитного модифицирования непрерывнолитого слитка в роторной литейной машине работоспособна, технически и технологически реализуема. Степень модифицирования структуры не уступает показателям использования пруткового модификатора Al-Ti-B, но при этом не происходит изменения химического сплава и роста удельного электросопротивления. Также при эксплуатации электромаг-

нитного модификатора требуется только электрическая энергия, что исключает необходимость постоянной поставки прутковой лигатуры Al-Ti-B и, как следствие, удорожания цены алюминиевой катанки.

Список источников

1. Баландин Г.Ф. Формирование кристаллического строения отливок. Москва: Машиностроение, 1973. 288 с.
2. Горбунов Ю.А. Некоторые аспекты развития алюминиевых сплавов для проводников тока и припоев // Цветные металлы-2012: сб. науч. ст. Красноярск, 2012. С. 828-833.
3. Чалмерс Б. Теория затвердевания / под ред. Приданцева М.В. Москва: Металлургия, 1968. 288 с.
4. Механические свойства алюминиевых сплавов: монография / Гриценко Н.А., Сидельников С.Б., Губанов И.Ю. и др. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. 196 с.
5. Повх И.Л., Капуста А.Б., Чекин Б.В. Магнитная гидродинамика в металлургии. Москва: Металлургия, 1974. 240 с.
6. 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, no. 2, pp 132-134.
7. Masahiro T. Electromagnetic Casting Technique for Slab Casting. Masahiro Tani, Masafumi Zeze Takehiko Toh, Keiji Tsunenari, NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT No. 104, AUGUST 2013.
8. Фетисов Г.П. Литейное производство: учебник для вузов. М. Из-во ЮРАЙТ-Восток, 2026. 59 с.
9. Материаловедение цветных металлов и сплавов / Попов А.А., Филиппов В.Р., Барз М.А., Гervасьев М.А. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2023. 312 с.
10. Черепашин А.А. Основы материаловедения. Москва: Академия, 2022. 206 с.
11. Плошкин В.В. Материаловедение. Москва: Изд-во Юрайт, 2024. 434 с.

Сведения об авторах

Боякова Татьяна Алексеевна – доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника», канд. техн. наук, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия. E-mail: boyakova_ta@mail.ru.

Снитко Ирина Сергеевна – доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника», канд. техн. наук, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия. E-mail: irant-kin@yandex.ru.

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

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

USE OF AN MHD DEVICE IN A ROTARY CASTER OF AN LPA-AK UNIT TO IMPROVE THE STRUCTURE OF AN ALUMINUM ALLOY A5E

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

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

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

Abstract. The article is issued the influence of electromagnetic modification on the macrostructure and microstructure of aluminum alloy grade A5E. The structure of the ingot in a rotary casting machine is non-uniform without modification during the crystallization process, that leads to the appearance of cracks and a large number of defective products. An electromagnetic modifier installation directly on a casting machine allows for significant improvement of the macrostructure of an A5E aluminum ingot and rod. The metal structure is refined and becomes more homogeneous. The effectiveness of modification was assessed by changes in grain size, shape and homogeneity of the alloy structure using metallographic studies. The work used samples from cast blanks and wire rod obtained at different parameters of current and frequency of the electromagnetic modifier. The microstructure were issued with optical microscope

“Neophot 21”. The results of the R&D work confirmed the possibility of refining the crystalline structure of a continuously cast billet cast in a rotary casting machine by means of exposure to an electromagnetic field. The results of the R&D work confirmed the possibility of grinding the crystalline structure of a continuously cast blank cast in a rotary casting machine by exposure on an electromagnetic field. It is predicted that the use of this technology in industry will improve the technological efficiency of processing wire rod into wire by drawing. This will ensure a reduction in the volume of defective products due to structural defects.

Keywords: foundry production, induction industry, electromagnetic modification, alloys, crystallization, macrostructures, microstructures, cast blank, wire rod

Ссылка на статью:

Боякова Т.А., Снитко И.С., Авдулов А.А. Использование МГД-устройства в роторной литейной машине агрегата ЛПА-АК для улучшения структуры слитка из сплава алюминия А5Е // Теория и технология металлургического производства. 2026. №3(58). С. 41-46. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-41-46](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-41-46)

Boyakova T.A., Snitko I.S., Avdulov A.A. Use of an MHD device in a rotary caster of an LPA-AK unit to improve the structure of an aluminum alloy A5E. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 57, no. 3, pp. 41-46. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-41-46](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-41-46)