

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 669:536.21

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-52-59



ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ВИБРОВОЗДЕЙСТВИИ

Уздиева Н.С., Ахтаев С.С.-С., Айсунгуров Н.Д.

Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

Аннотация. В данной статье авторами приведены результаты изучения процессов формирования структуры и свойств алюминиевых заготовок, отлитых под воздействием вибрации на установке полунепрерывного типа. В исследовании показано, что применение вибрации при формировании полунепрерывнолитых заготовок может заметно улучшить теплообмен в зонах принудительного охлаждения, что, в свою очередь, должно повлиять на качество металла в литой заготовке и повысить производительность процесса в целом. Было установлено, что под воздействием вибрации количество тепла, отводимого в кристаллизаторе, заметно повышается для обеих заготовок (из камфена и алюминиевого сплава). Это является важным прикладным фактором, так как в реальных условиях из-за недостаточного теплоотвода в кристаллизаторе отливаемые заготовки на выходе из него имеют небольшую толщину затвердевшей корки, что приводит к прорыву жидкого металла с вытекающими отсюда последствиями. При этом вибрация за счет силового воздействия на затвердевающий металл оказывает существенное влияние на формирование структуры и свойств отливаемых заготовок, которое заключается, во-первых, в провоцировании зарождения центров кристаллизации за счет кавитации и, во-вторых, в разрушении растущих кристаллов. Такое силовое воздействие виброимпульса, в частности, для алюминиевого сплава АД31 проявилось в том, что вибрация измельчает макро- и микроструктуру литого металла до 3 раз, а также повышает его прочностные характеристики до 20% при неизменной пластичности. Кроме этого, вибрация уменьшает зону транскристаллизации за счет разрушения столбчатых кристаллов и, соответственно, снижает структурную неоднородность и анизотропию свойств металла по сечению литой заготовки. Таким образом, исследование показывает преимущества применения вибрации при формировании полунепрерывнолитых заготовок и подтверждает ее значительный потенциал для улучшения качества получаемых заготовок и повышения производительности процесса непрерывного литья металлов. При этом наиболее оптимальной схемой приложения вибрации при непрерывной разливке металлов является одновременный подвод виброимпульса к кристаллизатору и отливаемой заготовке.

Ключевые слова: сплав, кристаллизация, структурообразование, свойства, теплообмен, литой металл, заготовка

© Уздиева Н.С., Ахтаев С.С.-С., Айсунгуров Н.Д., 2024

Для цитирования

Уздиева Н.С., Ахтаев С.С.-С., Айсунгуров Н.Д. Формирование полунепрерывнолитой заготовки при вибро-воздействии // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 52-59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-52-59>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

FORMATION OF SEMI-CONTINUOUSLY CAST BILLETS UNDER VIBRATION

Uzdieva N.S., Akhtaev S.S.-S., Aisungurov N.D.

Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia

Abstract. The article presents the results of a study on the processes of forming the structure and properties of aluminum billets cast under vibration on a semi-continuous casting machine. The study shows that vibration used in the formation of semi-continuously cast billets significantly improve heat exchange in the forced cooling zones, which, in turn, should influence the quality of the metal in cast billets and increase performance of the process in general. It has been found that under vibration heat removed in the mold increases significantly for both billets (made of camphene and the aluminum alloy). This is an important applied factor since in real conditions due to insufficient heat removal in the mold the exit cast billets have small thickness of the solidified shell, leading to a breakthrough of liquid metal with the relevant consequences. At the same time, vibration due to the force action on solidifying metal has a significant effect on the formation of the structure and properties of cast billets: firstly, provoking the nucleation of crystallization centers due to cavitation, and, secondly, the destruction of growing crystals. This force impact of the vibration pulse, in particular for aluminum alloy AD31, refines the macro- and microstructure of cast metal up to 3 times, and also increases its strength characteristics up to 20% with unchanged plasticity. Besides, vibration reduces the transcrystallization zone due to the destruction of columnar crystals and, consequently, reduces structural heterogeneity and anisotropy of the metal properties along the cross-section of the cast billet. Thus, the study shows the advantages of using vibration in the formation of semi-continuously cast billets and proves its significant potential for improving the quality of the produced billets and increasing performance of the continuous casting process. The most optimal process flow chart for applying vibration in continuous casting is to supply a vibration pulse to the mold and the cast billet at the same time.

Keywords: alloy, crystallization, structure formation, properties, heat transfer, cast metal, billet

For citation

Uzdieva N.S., Akhtaev S. S.-S., Aisungurov N.D. Formation of Semi-Continuously Cast Billets Under Vibration. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 52-59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-52-59>

Введение

В работах многих авторов изучалось влияние на качество литой заготовки такого важного показателя, как интенсивность отвода тепла, а следовательно, и скорости кристаллизации затвердевающего металла [1-10]. Известно, что скорость теплообмена, происходящего при затвердевании расплава, сказывается на скорости формирования зародышей и их дальнейшего роста, а эти параметры влияют на качественные свойства литой заготовки. Значительное воздействие на процессы кристаллизации и структурообразование металлов оказывают вибрационные импульсы за счет следующих эффектов [1-3, 5, 8]:

- улучшение кристаллической структуры литой заготовки, которое заключается в формировании более однородной и мелкозернистой структуры, что повышает механические свойства литого металла, такие как прочность, пластичность и ударная вязкость;

- равномерное распределение примесей, что снижает химическую неоднородность по сечению литой заготовки и вероятность образования горячих трещин;

- уменьшение усадочных раковин и пористости, в том числе за счет более полного удаления газовых пузырьков. Это улучшает его плотность и прочность;

- улучшение чистоты поверхности литой заготовки, что важно при дальнейшей его деформационной и механической обработке;

- повышение производительности литья металлов за счет интенсификации тепло- и массообменных процессов при этом;

- снижение внутренних напряжений, которые возникают в затвердевающем металле в результате неодновременности протекания фазовых превращений. Это может предотвратить возникновение трещин и повысить устойчивость к разрушению материала.

При этом следует отметить, что влияние вибрации на формирование структуры и свойств затвердевающего металлического сплава зависит от ряда факторов: типа и направления, амплитуды и частоты виброимпульса, типа металлического сплава и др. Поэтому при использовании вибрации в металлургических технологиях необходимо провести тщательный анализ характера и параметров вибрации в привязке к свойствам конкретного металлического сплава.

Материалы и методы исследования

В данной работе авторы приводят результаты исследования влияния вибрации на формирование полунепрерывнолитых заготовок из камфена (физиче-

ское моделирование) и сплава АД31. Заготовки из алюминия отливались на установке ПНЛЗ при температуре 710°C, форма заготовки – круг радиусом 31,5 мм. Диапазон частоты вибрации изменяли от нуля до 150 Гц, амплитуда вибрации регулировалась от нуля до 2 мм. При этом в первом случае вибровоздействие определенной частоты и соответствующей амплитуды оказывалось только на кристаллизатор ПНЛЗ, во втором одновременно воздействовали вибрацией и на кристаллизатор, и на заготовку.

Для сравнительного анализа отливалась контрольная заготовка без вибровоздействия.

С целью определения плотности и механических свойств изучаемых сплавов использовались образцы, вырезанные из разных зон заготовок, их же использовали в ходе проведения металлографического и термического анализов.

Исследование микро- и макроструктуры проводилось на шлифах после их химического травления по стандартным методикам.

Для проведения термического анализа контрольный и опытный образцы размещались в специальной пробнице установки, в которой доводились до температуры перегрева 760°C. Затвердевание достигалось охлаждением в специальных условиях. Анализ полученных результатов выполнялся согласно методике [7] с применением программного продукта компании Thermex – «Анализатор сплавов», которая позволяет визуализировать кривые охлаждения по участкам анализируемого образца с учетом дифференциации теплоотдачи по структурам исследуемого сплава.

Испытания по определению прочности и пластичности опытных образцов проведены согласно ГОСТ 1497-84.

Полученные результаты и их обсуждение

Затвердевание заготовки при непрерывном литье металлов происходит в результате теплоотвода в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения, но решающую роль при этом играют теплообменные процессы в кристаллизаторе. При анализе процесса теплообмена, происходящего в кристаллизаторе, были использованы следующие допущения.

Количество тепла, вносимое расплавленным металлом в кристаллизатор, можно условно разбить на следующие составляющие: тепло, передаваемое теплоносителю (то есть охлаждающей воде); тепло, уходящее лучеиспусканием через свободную поверхность расплава металла; тепло, затрачиваемое на нагрев металлического корпуса кристаллизатора; тепло, отводимое от наружных стенок кристаллизатора, и теплоту, уносимую отливаемой заготовкой из кристаллизатора в зону вторичного охлаждения [1, 8].

Всеми незначительными составляющими тепловых потерь в кристаллизаторе (потери тепла на лучеиспускание, на прогрев кристаллизатора и через его наружные стенки) можно пренебречь, так как они на

порядок меньше, чем теплоотвод охлаждающей водой. Поэтому можно допустить, что количество теплоты, подводимое жидким металлом к кристаллизатору, равно сумме теплоты, отводимой охлаждающей водой и уходящее из него с заготовкой [2, 8, 9].

В нашей лабораторной установке полунепрерывного литья металлов охлаждение заготовки в ЗВО не осуществлялось и, соответственно, его качество полностью зависело от теплоотвода в кристаллизаторе. При передаче тепла к охлаждающей воде в кристаллизаторе на его пути встречается множество тепловых барьеров, таких как корка затвердевающей заготовки, газовый зазор и шлаковый слой между стенкой кристаллизатора и металлом. То есть суммарный теплоотвод в кристаллизаторе зависит от теплопроводности всех вышеперечисленных барьеров.

Учитывая невозможность оценки значений всех коэффициентов теплопроводностей этих тепловых барьеров, при расчетах в данных условиях, по нашему мнению, можно принять количество тепла, передаваемое кристаллизатору, равным количеству тепла, отведенному охлаждающей водой, и определить его по известной физической формуле [11]:

$$Q_v = m_v C_v (T_k - T_n), \quad (1)$$

где m_v – масса воды в системе охлаждения, кг; C_v – теплоемкость воды, кДж/кг·°C; T_n и T_k – начальная и конечная температура воды в системе охлаждения, °C.

Для обеспечения стабильности процесса непрерывной разливки металлов необходимым условием тепловой работы кристаллизатора является снижение температуры поверхности отливаемой заготовки ниже температуры солидуса соответствующего сплава за счет передачи тепла охлаждающей воде. Физическое моделирование на органической среде камфена показало, что даже для такой низкотемпературной среды можно обеспечить это условие при соответствующей температуре теплоносителя (воды).

На **рис. 1** показано изменение температуры непрерывнолитой заготовки из камфена. Как видно из графика, именно в зоне кристаллизации происходит основное снижение температуры. При этом максимум интенсивности теплоотвода наблюдаем до точки А, то есть до образования газового зазора.

Для определения характера изменения плотности тепловых потоков от поверхности заготовки к стенке кристаллизатора были проведены эксперименты на камфене (метод физического моделирования) и на реальной заготовке из алюминиевого сплава [12, 13]. Результаты представлены на **рис. 2**.

Гистограмма на **рис. 2** четко демонстрирует для сопоставляемых вариантов исследований, что максимум плотности тепловых потоков отмечается на расстоянии 50 мм от поверхности заготовки для образца из камфена и 75 мм для образца из алюминия.

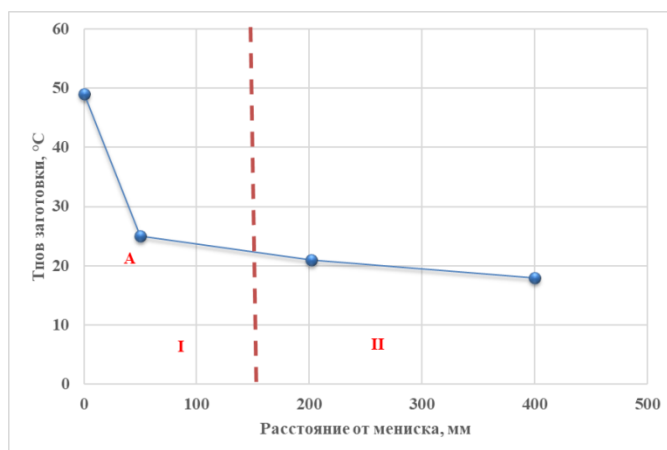


Рис. 1. Динамика изменения температуры поверхности непрерывнолитой модельной заготовки
Fig. 1. Changes in the surface temperature of a continuously cast model billet



Рис. 2. Зависимость плотности теплового потока по высоте кристаллизатора
Fig. 2. Dependence between heat flux density and mold height

Изменения плотности тепловых потоков по высоте кристаллизатора обусловлены формированием газового зазора между исследуемой заготовкой и стенкой кристаллизатора. Снижение интенсивности теплоотдачи от поверхности затвердевающей заготовки снижает отвод теплоты в различных зонах при продвижении непрерывной заготовки.

На кристаллизатор и зону вторичного охлаждения, то есть на участках, где применяется принудительное водяное охлаждение, приходится большая часть (не менее 3/4) отводимой от непрерывнолитой заготовки теплоты.

Выполненные в ходе экспериментальной работы (при формировании модельных заготовок из камфена и алюминиевого сплава АД31) расчеты теплового баланса представлены в табл. 1. Анализ полученных данных подтверждает взаимосоответствие относительных показателей теплоотвода в сопоставимых зонах для модельного и алюминиевого образцов.

На практике при производстве непрерывнолитых заготовок для интенсификации теплоотвода часто применяют технологические приемы с использованием внешних физических воздействий. В данных исследованиях в качестве такого приема использована вибрация, которая оказала положительное влияние в интен-

сификации теплообменных процессов в кристаллизаторе (см. табл. 1), а также оказала существенное воздействие на формирование кристаллической структуры отливаемых заготовок из исследуемых сплавов (рис. 3). В экспериментах были применены различные схемы приложения вибрации к отливаемым заготовкам: I – подвод вибрации к кристаллизатору; II – подвод вибрации к кристаллизатору и заготовке.

Было установлено, что эффективность вибровоздействия на процессы кристаллизации определяются схемой подвода вибрации к исследуемой заготовке. Результаты исследований, представленные на рис. 3, б и в, демонстрируют, что наиболее эффективным вариантом воздействия вибрации на образцы из алюминия (сплав АД 31) в данных экспериментах является схема II, при которой происходит наиболее существенное изменение кристаллической структуры литых заготовок. Силовое воздействие виброимпульса на затвердевающий металл приводит к разрушению ветвей дендритов в зоне транскристаллизации и отдельных плавающих кристаллов в жидкой фазе заготовки, что приводит к измельчению макроструктуры опытных заготовок, а также к сужению зоны столбчатых кристаллов и, как следствие, к расширению зоны равноосных кристаллов (см. рис. 3, табл. 2).

Таблица 1. Баланс теплоты, отводимой от непрерывнолитых заготовок
 Table 1. The balance of heat removed from continuously cast billets

Расход тепла	Без вибрации				С вибрацией ($A = 1$ мм; $\nu = 133$ Гц)			
	Образец из камфена		Образец из Al		Образец из камфена		Образец из Al	
	кДж	%	кДж	%	кДж	%	кДж	%
В кристаллизаторе	23	26	475	29	26	30	530	32
В зоне вторичного охлаждения	65	74	1175	71	62	70	1120	68
Всего	88	100	1650	100	88	100	1650	100

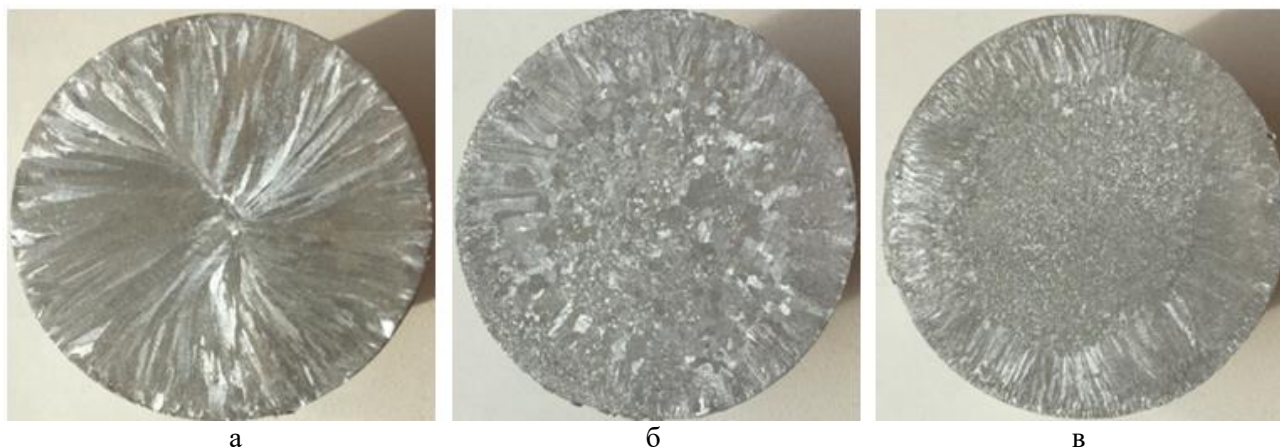


Рис. 3. Структура заготовки из алюминиевого сплава, $\times 1$:
 а – контрольный образец; б – подвод вибрации к кристаллизатору;
 в – подвод вибрации и к кристаллизатору, и к заготовке

Fig. 3. The structure of the aluminum alloy billet, $\times 1$:
 a is a reference sample; б is vibration supplied to the mold;
 в is vibration supplied to both the mold and the billet

Таблица 2. Основные структурные параметры заготовок из сплава АД31
 Table 2. Main structural parameters of the billets made of alloy AD31

Номер образца	Зона столбчатых кристаллов, мм	Зона равноосных кристаллов, мм	Средняя длина/ширина столбчатых кристаллов, мм	Средняя длина/ширина равноосных кристаллов, мм
1 (контрольный)	20-30	2,0-4,0	1,8/0,2	3,5/2,5
2 (опытный)	14-17	18,5-21,0	0,4/0,12	0,4/0,4
3 (опытный)	10-13	21,0-24,0	0,07/0,02	0,1/0,2

Примечание. Образец №1 – без вибрации; №2 – подвод виброимпульса к кристаллизатору; №3 – одновременный подвод виброимпульса к кристаллизатору и отливаемой заготовке.

Действительно, оказалось, что влияние вибрации на дисперсность микроструктур опытных заготовок из сплава АД31 оказалось аналогичным ее воздействию на дисперсность их макроструктур (рис. 4), о котором свидетельствуют данные о среднем размере микрзерна по зонам заготовок (табл. 3).

Независимо от условий формирования, микро-структура и контрольного и опытных образцов состоит в основном из кристаллов α -фазы, но при этом в контрольном образце размеры зерен α -фазы почти в 2 раза больше, чем в опытных. Изменения в макро-

микроструктурах заготовок, которые произошли под воздействием вибрации, привели к соответствующим изменениям в свойствах литого металла (табл. 4). К примеру, плотность литого металла в заготовках возрастает с 2670 кг/м^3 для контрольного образца до 2685 и 2705 кг/м^3 для опытных образцов №2 и 3 соответственно. Возросли также прочностные характеристики литого металла в опытных образцах на 25-30% относительно контрольного образца при практически одинаковой их пластичности (см. табл. 4).

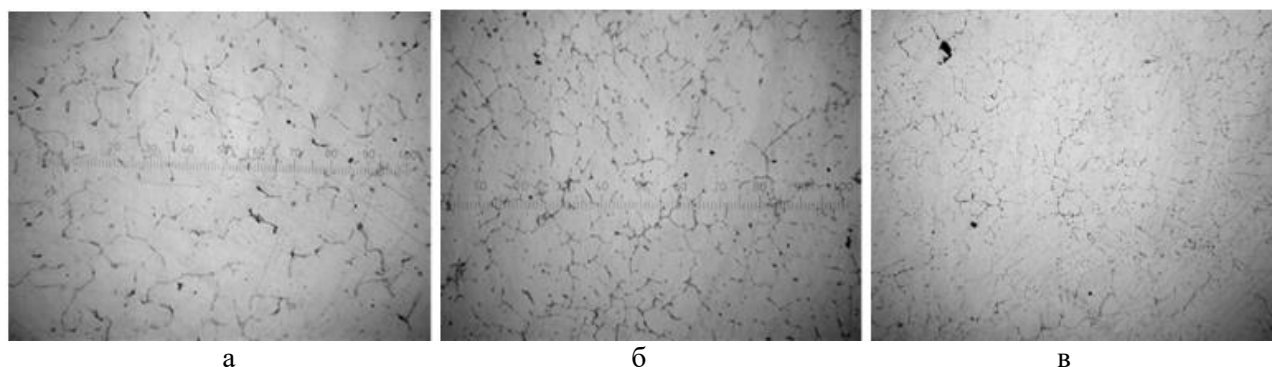


Рис. 4. Микроструктуры исследуемых образцов из сплава АД31, $\times 200$:
а – контрольный вариант (без вибрации); б – подвод виброимпульса к кристаллизатору;
в – одновременный подвод виброимпульса и к кристаллизатору, и к заготовке

Fig. 4. Microstructures of the samples made of alloy AD31 under study, $\times 200$:
a is a reference option (without vibration); б is a vibration pulse supplied to the mold;
v is a vibration pulse supplied to both the mold and the billet

Таблица 3. Средний размер микрочерен по сечению отливаемых заготовок из сплава АД31
T a b l e 3 . The average size of micrograins along the section of cast billets made of alloy AD31

Номер образца	Средний размер микрочерен в центральной зоне, мкм	Средний размер микрочерен в периферийной зоне, мкм
1 (контрольный)	188	385
2 (опытный)	139	179
3 (опытный)	91	162

Примечание. Образец №1 – без вибрации; №2 – подвод виброимпульса к кристаллизатору; №3 – одновременный подвод виброимпульса к кристаллизатору и отливаемой заготовке.

Таблица 4. Свойства металла в литой заготовке из сплава АД31
T a b l e 4 . Properties of metal in the cast billet made of alloy AD31

Сплав	Номер образца	Физические и механические характеристики литого металла			
		Плотность металла ρ , кг/м ³	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %
АД31	1	2670	53	68	21
	2	2685	60	78	20
	3	2705	69	86	19

Заключение

В ходе проведенных исследований по изучению воздействия вибрации на формирование полунепрерывнолитой заготовки, на интенсификацию теплоотвода от поверхности модельной (камфен) и алюминиевой полунепрерывнолитой заготовок доказано, что вибровоздействие положительно влияет на процесс теплоотвода от образца и усиливает теплообмен в зонах принудительного охлаждения. Вибрация сказывается на качестве литых заготовок и способствует повышению производительности машин непрерывного литья заготовок, что обусловлено интенсификацией отвода теплоты от затвердевающего расплава.

Результаты опытных данных по изучению воздействия вибрации на кристаллизующуюся полунепрерывнолитую заготовку свидетельствуют, что при этом,

наряду с интенсификацией теплообменных процессов, происходит повышение ее качества. Проявляется это в следующем: сужаются зоны столбчатых кристаллов, соответственно, расширяются зоны равноосных кристаллов, а также происходит измельчение макро- и микроструктуры заготовки. Такие изменения в структуре опытной заготовки повышают прочность и плотность литого металла. Лучший результат был получен при одновременном вибровоздействии как на кристаллизатор, так и на затвердевающую заготовку. К тому же проведенные исследования по изучению вопросов влияния вибровоздействия на формирование заготовок в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения позволяют конструкторам предусмотреть оптимизацию конструкций этих зон в установках непрерывной и полунепрерывной разливки металлических сплавов.

Список источников

1. Нурадинов А.С., Таранов Е.Д., Эльдарханов А.С. Влияние вибрации на теплофизические условия формирования непрерывнолитой заготовки // Процессы литья. 2011. №2. С. 34-38.
2. Нурадинов А.С., Уздиева Н.С., Ахтаев С.С.-С. Валковая разливка – прокатка высокопрочных алюминиевых сплавов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Т. 19. №1 (31). С. 58-66.
3. Кристаллизация и формирование структуры алюминиевых сплавов и отливок после внешних физических воздействий в процессе литья / Приходько О.Г., Деев В.Б., Прусов Е.С. и др. // Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XXII Международной научно-практической конференции. Новокузнецк, 2021. С. 316-321.
4. Прусов Е.С., Деев В.Б., Рахуба Е.М. Влияние условий кристаллизации на формирование структуры композиционных сплавов // Литейное производство. 2019. №3. С. 6-8.
5. Влияние нерастворимых примесей и вибрации на кристаллизационные процессы в расплавах металлов / Уздиева Н.С., Нурадинов А.С., Ахтаев С.С.-С., Исаева М.Р. // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Т. 19. №2 (32). С. 57-63.
6. Numerical simulation of the twin-roll casting process of magnesium alloy strip / Zeng J., Koitzsch R., Pfeifer H., Friedrich B. // Journal of Materials Processing Technology. 2009, vol. 209, pp. 2321-2328.
7. Смольский А.А., Семенченко А.И., Елов С.М. Термический анализ алюминиевых сплавов // Процессы литья. 2002. № 1. С. 10-16.
8. Управление теплообменными процессами в валковом кристаллизаторе при бесслитковой прокатке металлов / Эльдарханов А.С., Нурадинов А.С., Уздиева Н.С. и др. // Сталь. 2022. № 4. С. 7-11.
9. Study of the possibility of controlling the formation of crystal structure of metal alloys / Nuradinov A.S., Nogovitsyn A.V., Nuradinov I.A. and other // Science and innovation. 2020, no. 16 (4), pp. 67-73.
10. Mixing effect of slag compositions and additives on crystallization of mold fluxes for Ti-bearing steels / Wei Yan, Zhanquan Hao, Weiqing Chen, Jing Li // Journal of Materials Research and Technology. 2021, vol. 10, pp. 882-894.
11. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики. Справочник. К.: Наукова думка, 1989. 864 с.
12. Нурадинов А.С. Теплообменные процессы при формировании непрерывнолитых заготовок // Литейщик России. 2006. № 7. С. 34-37.
13. Нурадинов А.С., Эльдарханов А.С., Таранов Е.Д. Теплообменные процессы при формировании НЛЗ в поле упругих колебаний // Сталь. 2006. № 6. С. 51-52.

References

1. Nuradinov A.S., Taranov E.D., Eldarkhanov A.S. The influence of vibration on the thermophysical conditions of forming continuously cast billets. *Protsessy litya* [Casting Processes]. 2011;(2):34-38. (In Russ.)
2. Nuradinov A.S., Uzdieva N.S., Akhtaev S.S.-S. Roll casting: rolling of high-strength aluminum alloys. *Vestnik GGNTU. Tekhnicheskie nauki* [Herald of Grozny State Oil Technical University. Technical Sciences]. 2023;19(1(31)):58-66. (In Russ.)
3. Prikhodko O.G., Deev V.B., Prusov E.S. et al. Crystallization and formation of the structure of aluminum alloys and castings after external physical actions in the casting process. *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo: trudy XXII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Metallurgy: Technologies, Innovations, Quality. Proceedings of the 22nd International Scientific and Practical Conference]. Novokuznetsk, 2021, pp. 316-321. (In Russ.)
4. Prusov E.S., Deev V.B., Rakhuba E.M. Influence of crystallization conditions on the formation of the structure of composite alloys. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry]. 2019;(3):6-8. (In Russ.)
5. Uzdieva N.S., Nuradinov A.S., Akhtaev S.S.-S., Isaeva M.R. Effect of insoluble impurities and vibration on crystallization processes in molten metals. *Vestnik GGNTU. Tekhnicheskie nauki* [Herald of Grozny State Oil Technical University. Technical Sciences]. 2023;19(2(32)):57-63. (In Russ.)
6. Zeng J., Koitzsch R., Pfeifer H., Friedrich B. Numerical simulation of the twin-roll casting process of magnesium alloy strip. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209:2321-2328.
7. Smulsky A.A., Semenchenko A.I., Elov S.M. Thermal analysis of aluminum alloys. *Protsessy litya* [Casting Processes]. 2002;(1):10-16. (In Russ.)
8. Eldarkhanov A.S., Nuradinov A.S., Uzdieva N.S. et al. Control of heat exchange processes in a roll mold during rolling from the molten condition. *Stal* [Steel]. 2022;(4):7-11. (In Russ.)
9. Nuradinov A.S., Nogovitsyn A.V., Nuradinov I.A. et al. Study of the possibility of controlling the formation of crystal structure of metal alloys. *Science and Innovation*. 2020;(16(4)):67-73.
10. Wei Yan, Zhanquan Hao, Weiqing Chen, Jing Li. Mixing effect of slag compositions and additives on crystallization of mold fluxes for Ti-bearing steels. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;10:882-894.
11. Kuzmichev V.E. *Zakony i formuly fiziki. Spravochnik* [Laws and formulas of physics. Handbook]. Kyiv: Naukova dumka, 1989, 864 p. (In Russ.)
12. Nuradinov A.S. Heat exchange processes in the formation of continuously cast billets. *Liteyshchik Rossii* [Foundry of Russia]. 2006;(7):34-37. (In Russ.)
13. Nuradinov A.S., Eldarkhanov A.S., Taranov E.D. Heat exchange processes during the formation of con-cast billets in the field of elastic vibrations. *Stal* [Steel]. 2006;(6):51-52. (In Russ.)

Поступила 05.03.2024; принята к публикации 07.08.2024; опубликована 30.09.2024
Submitted 05/03/2024; revised 07/08/2024; published 30/09/2024

Уздиева Наталья Супьяновна – кандидат технических наук, доцент,
Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова,
Грозный, Россия.
Email: usdv-95@yandex.ru 0009-0005-2855-2223

Ахтаев Салман Саид-Селимович – кандидат технических наук, доцент,
Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова,
Грозный, Россия.
Email: usdv-95@yandex.ru

Айсунгуров Ноха Джабраилович – кандидат технических наук, доцент,
Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова,
Грозный, Россия.

Natalia S. Uzdieva – PhD (Eng.), Associate Professor,
Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia.
Email: usdv-95@yandex.ru. 0009-0005-2855-2223

Salman S.-S. Akhtaev – PhD (Eng.), Associate Professor,
Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia.
Email: usdv-95@yandex.ru

Nokha D. Aisungurov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia.