УДК 669.18

А.Н. Смирнов[1], д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр, e-mail: stalevoz@i.ua, https://orcid.org/0000-0001-5247-3908
В.Е. Ухин[2], канд. техн. наук, инженер по патентной и изобретательской работе, e-mail: ukhinvladimir@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3560-4130, http://www.researcherid.com/rid/P-9805-2015
А.П. Верзилов[1], канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: verzilovalex@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0463-5006

[1]Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина,
[2]ОАО «Шеффилд рефракторис Украина», Днепр, Украина

Исследование особенностей формирования кристаллической структуры непрерывнолитой заготовки при принудительном перемешивании ее жидкой сердцевины

Наиболее эффективным методом исследования динамики затвердевания различного рода слитков является физическое моделирование. Создана физическая модель, имитирующая поперечное сечение непрерывнолитой заготовки. Представлены результаты физического моделирования процесса затвердевания непрерывнолитой заготовки при принудительном перемешивании ее жидкой сердцевины. Отображены особенности формирования кристаллической структуры непрерывнолитой сортовой заготовки в процессе принудительного перемешивания ее жидкой сердцевины магнитным полем на разных этапах затвердевания. В результате проведенных экспериментов установлено, что в процессе принудительного перемешивания жидкой сердцевины при взаимодействии потока расплава с фронтом затвердевания скорость роста ветвей дендрита первого порядка снижается на 50–90 %, а скорость роста ветвей второго порядка увеличивается по сравнению со спокойным состоянием ванны на 20–90 %. При этом наибольшие значения увеличения скорости роста наблюдаются у дендритов, вторичные ветви которых растут в направлении, противоположном движению потока жидкости. Преимущественное развитие ветвей второго порядка дендритов кристаллов в этом случае позволяет заполнить объемы жидкости в межкристаллическом пространстве и увеличить плотность твердой оболочки. Показано, что вершины столбчатых кристаллов, выступающих за фронт затвердевания, отламываются, осколки дендритов попадают в жидкую ванну, а сами кристаллы деформируются при столкновении с движущимися равноосными кристаллами. При этом линия фронта затвердевания выравнивается, а формирующаяся кристаллическая структура уплотняется. Наличие частиц твердой фазы перед фронтом затвердевания в зоне роста столбчатых кристаллов, в свою очередь, при определенных условиях способствует ускорению перехода от зоны столбчатых к зоне равноосных кристаллов.

Ключевые слова: *машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), затвердевание, непрерывнолитая заготовка, кристаллическая структура, непрерывная разливка, электромагнитное перемешивание.*

В процессе разливки стали на МНЛЗ на формирующуюся заготовку оказываются различного рода воздействия, которые включают конвективное движение потоков металла и вдуваемого газа в кристаллизаторе, вибрационные и электромагнитные воздействия, упруго-пластические деформации и пр. [1].

Для подавления и предотвращения дефектов кристаллизационного, усадочного и ликвационного характера все большее распространение получают специальные технические приемы, которые позволяют управлять качеством металла за счет регламентированного принудительного перемешивания жидкой фазы непрерывнолитой заготовки посредством наложения различного рода электромагнитных полей [2–6].

Несмотря на технические трудности, существенные положительные результаты по применению электромагнитных воздействий в части торможения потоков стали и стабилизации уровня расплава в кристаллизаторах были достигнуты еще в 80-е годы прошлого века. Такой научно-технологический прорыв стал возможен благодаря развитию представлений о механизме кристаллизации непрерывнолитых заготовок в условиях воздействия на фронт кристаллизации принудительных потоков [7], а также благодаря разработке нового поколения электротехнического

оборудования на соответствующей элементной базе, новых составов огнеупорных материалов, имеющих высокую термическую, химическую и механическую стойкость.

На сегодня разработан целый ряд электромагнитных устройств, применяемых в различных зонах МНЛЗ для влияния на затвердевающую заготовку. Мировыми лидерами в этом направлении являются компании ABB и *JFE Steel* [8].

Электромагнитное перемешивание (ЭМП) жидкотвердой фазы непрерывнолитой заготовки является результатом сложного взаимодействия электродинамических, магнитогидродинамических и металлургических факторов. Создаваемое системой ЭМП магнитное поле, проникая сквозь затвердевшую оболочку слитка, инициирует в жидкой стали вихревые токи, под действием которых металл начинает вращаться. ЭМП улучшает качество подповерхностной и осевой зоны непрерывнолитых заготовок, так как оно воздействует на формирование кристаллической структуры, перемещение неметаллических включений, химическую ликвацию и распределение газов [1].

Цель настоящей статьи заключается в изучении особенностей формирования кристаллической структуры непрерывнолитой сортовой заготовки в процессе принудительного перемешивания ее жидкой сердцевины магнитным полем на разных этапах затвердевания.

Наиболее эффективным методом исследования динамики затвердевания различного рода слитков является физическое моделирование, поскольку в этом случае удается контролировать отвод тепла от исследуемого объекта в совокупности с визуализацией основных процессов, сопровождающих наращивание твердой фазы [1, 9–11]. При этом особое значение приобретает выбор моделирующего вещества, которое должно не только обладать оптической прозрачностью, но также иметь определенную совокупность теплофизических характеристик, позволяющих обеспечить соответствующую систему критериев подобия. Дополнительным условием, которое представляется, по мнению авторов статьи, крайне важным, является затвердевание вещества по дендритному механизму.

Как показывает анализ, в наибольшей степени вышеперечисленным требованиям удовлетворяет химическое соединение камфен (2,2-диметил-3-метилен-бициклогептан), которое затвердевает с образованием дендритной структуры. При этом в жидком состоянии камфен сохраняет оптическую прозрачность вплоть до полного затвердевания. Теплофизические свойства камфена, которые были определены авторами в лабораторных условиях, приведены в табл. 1 [12].

Для исследования особенностей формирования кристаллической структуры была создана физическая модель, имитирующая поперечное сечение непрерывнолитой сортовой заготовки. Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рис. 1.

Расплав камфена затвердевал в модели кристаллизатора, которая изготовлена из алюминиевого сплава, что обеспечивает высокую интенсивность отвода тепла. Внутри модели кристаллизатора вмонтированы медные трубки диаметром 5 мм, через которые с определенным расходом пропускается охлаждающая вода. К нижней части модели приклеено прозрачное стекло, которое позволяет визуализировать процессы затвердевания при пропускании света через жидкую ванну. Соответственно, при такой схеме интенсивность теплоотвода через водоохлаждаемые стенки модели на несколько порядков выше, чем через мениск моделирующего вещества и прозрачное стекло.

Физическая модель выполнена в масштабе 1:1 по отношению к моделируемому объекту – непрерывнолитой сортовой заготовке сечением 100×100 мм. Температура заливки камфена составляла 38 ± 0,5 °С. Среднее значение температуры воды для охлаждения стенок модели составляло 18–20 °С. С целью предотвращения влияния теплоотвода через стекло и мениск расплавленного камфена на процесс затвердевания высота модельного слоя жидкости была принята равной 20 мм.

Компенсация различий в теплофизических параметрах стали и камфена осуществлялась путем регулирования интенсивности режимов отвода тепла таким образом, чтобы выполнялось условие тождественности произведения критерия Био (*Bi*) и критерия фазового перехода (*N*) (*Bi*·*N* = idem). Временной масштаб моделирования μ_τ определяли исходя из идентичности критерия Фурье (*Fo* = idem) в соответствии с формулой:

$$\mu_\tau = \frac{a_m}{a_{st}} \cdot \mu_L^2, \qquad (1)$$

где a_m и a_{st} – коэффициенты температуропроводности моделирующего вещества и стали соответственно.

При этом наличие развитой двухфазной зоны учитывалось посредством эффективных значений коэффициентов температуропроводности, которые определялись при помощи следующего уравнения:

$$a_{эф} = \lambda / \rho\left(C + L / \Delta T_{кр}\right), \qquad (2)$$

Таблица 1

Некоторые физические и теплофизические свойства камфена

Температура солидус, °С	Температура ликвидус, °С	Теплота кристаллизации, кДж/кг	Теплоемкость, кДж/(кг·К)		Температуропроводность, м²/с	Поверхностное натяжение, Н/м	Кинематическая вязкость, м²/с
			жидкий	твердый			
33	35	40,2	2,4	2,1	$1{,}3\cdot10^{-8}$	0,021	$7{,}2\cdot10^{-6}$

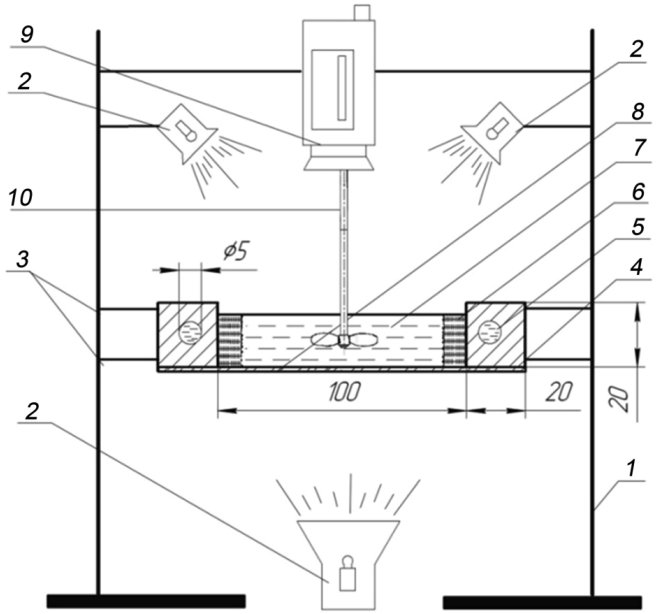


Рис. 1. Общая схема лабораторной установки для моделирования процесса затвердевания заготовки в кристаллизаторе: *1* – фиксирующая рама; *2* – осветительные лампы; *3* – фиксаторы для поддержания кристаллизатора; *4* – кристаллизатор; *5* – отверстия для пропускания охлаждающей воды; *6* – твердый слой камфена, намерзший в ходе затвердевания; *7* – жидкий объем моделирующего вещества; *8* – прозрачное органическое стекло с низкой теплопроводностью; *9* – видеокамера; *10* – лабораторная двухлопастная пропеллерная мешалка

где λ – коэффициент теплопроводности вещества, Вт/(м·К); ρ – плотность вещества, кг/м^3; *C* – средняя массовая теплоемкость вещества, кДж/(кг·К); *L* – теплота кристаллизации вещества, кДж/кг; $\Delta T_{кр}$ – интервал температур затвердевания, °С.

Принудительное перемешивание расплава модельного вещества по часовой стрелке в горизонтальной плоскости осуществлялось с помощью лабораторной двухлопастной пропеллерной мешалки, установленной в центре физической модели, со скоростью 60 оборотов в минуту.

Процесс формирования твердой корочки вещества в лабораторной модели фиксировался при помощи цифровой видеокамеры в режиме макросъемки, что позволило визуализировать образование кристаллов и особенности формирования дендритной структуры.

В ходе физического моделирования при отсутствии перемешивания жидкой фазы установлено, что механизм затвердевания модельного вещества при исследовании особенностей формирования кристаллической структуры непрерывнолитой заготовки имеет существенные отличия от «классического» механизма кристаллизации, при котором кристаллы растут параллельно друг другу (рис. 2).

Основной особенностью формирования кристаллической структуры является то, что направление роста столбчатых кристаллов в большинстве случаев является хаотичным относительно поверхности теплоотвода, а скорости роста отдельных дендритов отличаются на 25–35 %. При этом развитие близлежащих кристаллов прекращается из-за столкновения с вторичными ветвями более интенсивно развивающихся дендритов. Следствием этого процесса является отставание в затвердевании части жидкой фазы в междендритном пространстве толщиной равной 20–40 % от толщины твердой фазы слитка (рис. 3, *а*) [13].

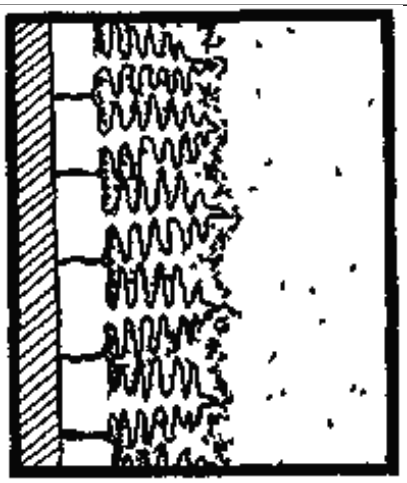
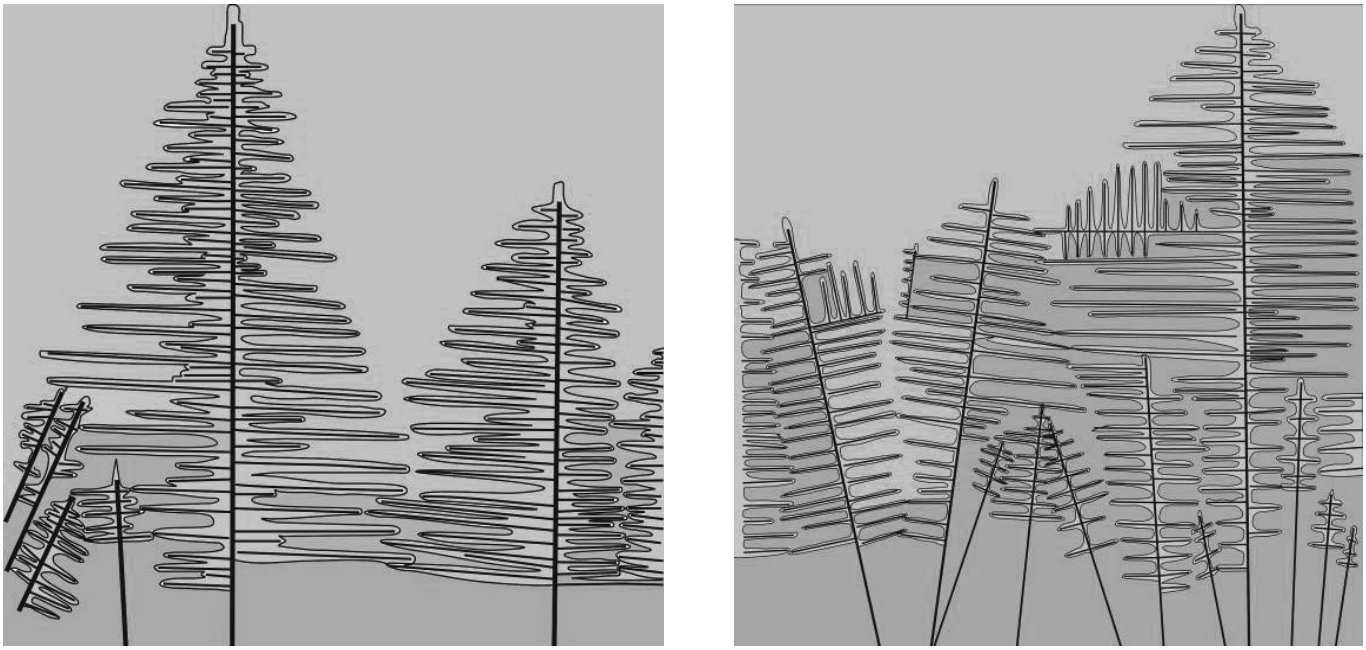


Рис. 2. Схема «классического» механизма роста дендритных кристаллов

Также физическое моделирование показало, что некоторые рядом расположенные столбчатые кристаллы растут под небольшим углом в разные стороны друг от друга. Это приводит к локальному проникновению жидкой фазы вглубь плотной твердой оболочки на 40–60 %, что способствует локальному ухудшению прочности корочки в этой области, и что может стать причиной зарождения и образования трещин при появлении в этой зоне механических или температурных напряжений (рис. 3, *б*) [13].

Для изучения влияния электромагнитного перемешивания на формирование корочки заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ вращение жидкой фазы модельного вещества в горизонтальной плоскости осуществлялось при условиях формирования развитой дендритной структуры и отсутствия равноосных кристаллов в расплаве. В результате проведенных экспериментов установлено, что в процессе принудительного перемешивания жидкой сердцевины при взаимодействии потока расплава с фронтом затвердевания, скорость роста ветвей дендрита первого порядка снижается на 50–90 %, а скорость роста ветвей второго порядка увеличивается по сравнению со спокойным состоянием ванны на 20–90 % (рис. 4, *а*). При этом наибольшие значения увеличения скорости роста наблюдаются у дендритов, вторичные ветви которых растут в направлении, противоположном движению потока жидкости. Преимущественное развитие ветвей второго порядка дендритов кристаллов в этом случае позволяет заполнить объемы жидкости в межкристаллическом пространстве и увеличить плотность твердой оболочки.

Исследование особенностей формирования кристаллической структуры заготовки в зоне вторичного охлаждения (ЗВО) при принудительном перемешивании жидкой сердцевины производилось при условии наличия развитой дендритной структуры и присут-

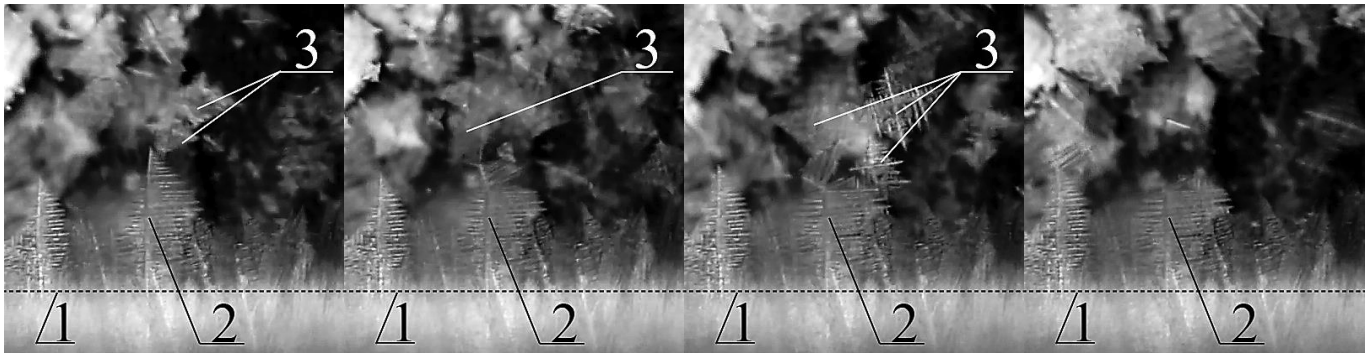


а *б*

Рис. 3. Схемы дендритных структур непрерывнолитой заготовки

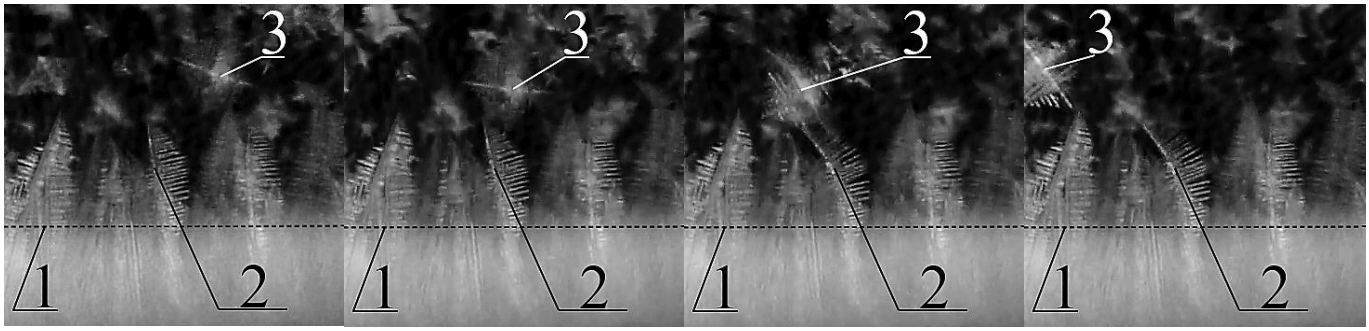
ствия свободно перемещающихся равноосных кристаллов в расплаве. Физическое моделирование показало, что двигающиеся вместе с потоком металла равноосные кристаллы могут сталкиваться с выступающими над фронтом затвердевания вершинами столбчатых кристаллов и отламывать их (рис. 4, *б, в, г*). При этом отломанные части дендритов попадают в расплав и могут служить центрами кристаллизации. Также установлено, что при столкновении с массивным равноосным кристаллом столбчатый кристалл может деформироваться, при наличии достаточного количества пространства в формирующейся оболочке, и вытеснить собой жидкую фазу (рис. 5).

В результате выполненных исследований установлено, что в процессе принудительного перемешивания жидкой сердцевины непрерывнолитой заготовки при взаимодействии потока расплава с фронтом затвердевания, снижается интенсивность роста пер-



а *б* *в* *г*

Рис. 4. Кинограмма процесса отделения верхней части дендрита при ее столкновении с движущимся в расплаве равноосным кристаллом: *1* – фронт затвердевания; *2* – столбчатый кристалл; *3* – равноосный кристалл



а *б* *в* *г*

Рис. 5. Кинограмма процесса деформации дендрита при его столкновении с движущимся в расплаве равноосным кристаллом: *1* – фронт затвердевания; *2* – столбчатый кристалл; *3* – равноосный кристалл

вичных ветвей дендритов, а скорость роста ветвей второго порядка, направленных против движения жидкости, увеличивается в 1,2–1,9 раза, что повышает плотность и прочность корочки слитка. Показано, что вершины столбчатых кристаллов, выступающих за фронт затвердевания, отламываются, осколки дендритов попадают в жидкую ванну, а сами кристаллы деформируются, при столкновении с движущимися равноосными кристаллами. При этом линия фронта затвердевания выравнивается, а формирующаяся кристаллическая структура уплотняется. Наличие частиц твердой фазы перед фронтом затвердевания в зоне роста столбчатых кристаллов, в свою очередь, при определенных условиях способствует ускорению перехода от зоны столбчатых к зоне равноосных кристаллов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Смирнов А.Н., Куберский С.В., Подкорытов А.Л.* и др. Непрерывная разливка сортовой заготовки Алчевск: ДонГТУ, 2012. 449 с.
2. *Ефимов В.А.* Современные технологии разливки и кристаллизации сплавов. М.: Машиностроение, 1998. 360 с.
3. *Айзатулов Р.С., Кузьменко А.Г., Грачев В.Г.* и др. Электромагнитное перемешивание жидкой стали в металлургии. М.: Металлургия, 1996. 184 с.
4. *Самойлович Ю.А.* Кристаллизация слитка в электромагнитном поле. М.: Металлургия, 1986. 168 с.
5. *Бират Ж.-П., Шоне Ж.* Электромагнитное перемешивание при непрерывной разливке заготовок, блюмов и слябов. *Достижения в области непрерывной разливки стали. Тр. Международного конгресса.* М.: Металлургия, 1987. С. 98–116.
6. *Гарнье М.* Возможности и перспективы электромагнитной обработки материалов. *Магнитная гидродинамика*. 1996. Т. 32. № 2. С. 131–140.
7. *Смирнов А.Н., Пилюшенко В.Л., Дубоделов В.И.* и др. Открытие № 299 «Закономерность гомогенизации металлического расплава и эжектирование неметаллических включений при наложении вертикальных потоков в расплаве» // Рег. № АНО/40-09 от 12.12.2005 г. на основании Решения № 181 от 09.12.2005 г. Международной Ассоциации Авторов Научных Открытий.
8. *Эйдем М., Хаклю Х., Коллберг С.* Применение устройств электромагнитного перемешивания (EMS) и установок электромагнитного торможения (EMBR) при производстве стали. *Труды международной конференции «Черная металлургия России и стран СНГ в 21 веке».* Том 1. М.: Металлургия. 1994. С. 231–238.
9. *Смирнов А.Н., Пилюшенко В.Л., Момот С.В., Амитан В.Н.* Затвердевание металлического расплава при внешних воздействиях. Донецк: Изд-во «ВИК», 2002. 169 с.
10. *Эльдарханов А.С., Ефимов В.А., Нурадинов А.С.* Процессы формирования отливок и их моделирование. М.: Машиностроение, 2001. 208 с.
11. *Смирнов А.Н., Куберский С.В., Головчанский А.В., Максаев Е.Н., Ухин В.Е.* Исследование особенностей формирования следов качания на поверхности непрерывнолитой заготовки. *Известия ВУЗов. Черная металлургия.* 2016. Т. 59. № 4. С. 226–231.
12. *Смирнов А.Н., Ухин В.Е., Жибоедов Е.Ю.* Физическое моделирование условий формирования непрерывнолитой сортовой заготовки в кристаллизаторе высокоскоростной МНЛЗ. *Процессы литья*. 2009. № 1. С. 33–42.
13. *Ухин В.Е.* Исследование процесса формирования кристаллической структуры непрерывнолитой сортовой заготовки в кристаллизаторе высокопроизводительной МНЛЗ. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Металургія».* 2012. Випуск 14–15. С. 58–67.

Поступила 25.06.2018

REFERENCES

1. *Smirnov, A.N., Kubersky, S.V., Podkorytov, A.L.* et al. (2012). Continuous casting of billets. Alchevsk: DonSTU, 449 p. [in Russian].
2. *Efimov, V.A.* (1998). Modern technologies of casting and crystallization of alloys. Moscow: Mashinostroenie, 360 p. [in Russian].
3. *Aizatulov, R.S., Kuzmenko, A.G., Grachev, V.G.* et al. (1996). Electromagnetic stirring of liquid steel in metallurgy. M.: Metallurgiya, 184 p. [in Russian].
4. *Samoilovich, Yu.A.* (1986). Crystallization of an ingot in an electromagnetic field. Moscow: Metallurgiya. 168 p. [in Russian].
5. *Birat, J.-P., Chaunay, J.* (1987). Electromagnetic stirring during continuous casting of billets, blooms and slabs. *Achievements in the field of continuous casting of steel. Tr. International Congress.* Moscow: Metallurgiya, pp. 98–116 [in Russian].
6. *Garnier, M.* (1996). Opportunities and prospects of electromagnetic processing of materials. *Magnetic hydrodynamics*, Vol. 32, no. 2, pp. 131–140 [in Russian].
7. *Smirnov, A.N., Pilyushenko, V.L., Dubodelov V.I.* et al. (2005). Opening No. 299 “The regularity of homogenization of a metal melt and ejection of non-metallic inclusions when superimposing vertical flows in the melt”. Reg. No. ANO/40–09 dated December 12, 2005 on the basis of Decision No. 181 dated December 9, 2005 of the International Association of Authors of Scientific Discoveries [in Russian].

8. *Eidem, M., Hackle, H., Kollberg, S.* (1994). The use of electromagnetic stirring devices (EMS) and electromagnetic braking systems (EMBR) in steel production. *Proceedings of the international conference "Iron and Steel of Russia and the CIS in 21 century".* Moscow: Metallurgiya, Vol. 1, pp. 231–238 [in Russian].
9. *Smirnov, A.N., Pilyushenko, V.L., Momot, S.V., Amitan, V.N.* (2002). Solidification of a metal melt under external influences. Donetsk: VIK Publishing House, 169 p. [in Russian].
10. *Eldarkhanov, A.S., Efimov, V.A., Nuradinov, A.S.* (2001). The processes of formation of castings and their modeling. Moscow: Mashinostroenie, 208 p. [in Russian].
11. *Smirnov, A.N., Kubersky, S.V., Golovchansky, A.V., Maksaev, E.N., Ukhin, V.E.* (2016). Study of the features of the formation of swing marks on the surface of a continuously cast billet. *Proceedings of universities. Ferrous metallurgy,* Vol. 59, no. 4, pp. 226–231 [in Russian].
12. *Smirnov, A.N., Ukhin, V.E., Zhiboedov, E.Yu.* (2009). Physical modeling of the conditions for the formation of continuously cast billets in a mold of high-speed continuous casting machine. *Casting processes*, no. 1, pp. 33–42 [in Russian].
13. *Ukhin, V.E.* (2012). Investigation of the process of formation of the crystal structure of continuously cast billet in the mold of high-performance continuous casting machine. *Scientific works of DonNTU. Seriya "Metallurgy",* Vol. 14–15, pp. 58–67 [in Russian].

Received 25.06.2019

Анотація

О.М. Смірнов[1], д-р техн. наук, проф., пров. наук. співр.,
e-mail: stalevoz@i.ua, https://orcid.org/0000-0001-5247-3908
В.Є. Ухін[2], канд. техн. наук, інженер з патентної та винахідницької роботи,
e-mail: ukhinvladimir@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3560-4130,
http://www.researcherid.com/rid/P-9805-2015
О.П. Верзілов[1], канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
e-mail: verzilovalex@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0463-5006

[1]*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, Україна*
[2]*ВАТ «Шеффілд рефракторіс Україна», Дніпро, Україна*

Дослідження особливостей формування кристалічної структури безперервнолитої заготовки під час примусового перемішування її рідкої серцевини

Найбільш ефективним методом дослідження динаміки твердіння різного роду злитків є фізичне моделювання. Створено фізичну модель, що імітує поперечний переріз безперервнолитої заготовки. Представлено результати фізичного моделювання процесу твердіння безперервнолитої заготовки під час примусового перемішування її рідкої серцевини. Відображено особливості формування кристалічної структури безперервнолитої сортової заготовки в процесі примусового перемішування її рідкої серцевини магнітним полем на різних етапах твердіння. В результаті проведених експериментальних досліджень було встановлено, що в процесі примусового перемішування рідкої серцевини при взаємодії потоку розплаву з фронтом твердіння швидкість росту гілок дендритів першого порядку знижується на 50–90 %, а швидкість росту гілок другого порядку збільшується в порівнянні зі спокійним станом ванни на 20–90 %. При цьому найбільші значення збільшення швидкості росту спостерігаються у дендритів, вторинні гілки яких ростуть в напрямку, протилежному руху потоку рідини. Переважний розвиток гілок другого порядку дендритів кристалів в цьому випадку дозволяє заповнити обсяги рідини в міжкристалічному просторі і збільшити щільність твердої оболонки. Показано, що вершини стовпчастих кристалів, які виступають за фронт твердіння, відламуються, осколки дендритів потрапляють в рідку ванну, а самі кристали деформуються, при зіткненні з рівновісними кристалами, що рухаються. При цьому лінія фронту твердіння вирівнюється, а кристалічна структура, що формується, ущільняється. Наявність частинок твердої фази перед фронтом твердіння в зоні росту стовпчастих кристалів, в свою чергу, за певних умов сприяє прискоренню переходу від зони стовпчастих до зони рівновісних кристалів.

Ключові слова

Машина безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), твердіння, безперервнолита заготовка, кристалічна структура, безперервне розливання, електромагнітне перемішування.

A.N. Smirnov[1], Dr. Sci. (Engin.), Professor, Leading Researcher,
e-mail: stalevoz@i.ua, https://orcid.org/0000-0001-5247-3908
V.E. Ukhin[2], PhD (Engin.), engineer for patent and inventive work,
e-mail: ukhinvladimir@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3560-4130,
http://www.researcherid.com/rid/P-9805-2015
A.P. Verzilov[1], PhD (Engin.), Senior Research Scientist,
e-mail: verzilovalex@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0463-5006

[1]*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine*
[2]*Sheffield Refractoris Ukraine OJSC, Dnipro, Ukraine*

Investigation of billet crystal structure formation features during forced stirring of its liquid core

Summary

The most effective method for studying the dynamics of solidification of various kinds of ingots is physical modeling. A physical model that simulates a cross section of a continuously cast billet was created. The results of physical modeling of the continuously cast billet solidification process with the forced stirring of its liquid core are presented. The features of the continuously cast billet crystal structure formation during the forced stirring of its liquid core with a magnetic field at different stages of solidification are shown. As a result of the experiments it was established, that during the forced stirring of the liquid core, when the melt flow interacts with the solidification front, the growth rate of the first order dendrite branches decreases by 50–90 %, and the growth rate of the second order branches increases compared to the calm state of the bath by 20–90 %. In this case, the highest values of increase in growth rate are observed in dendrites, the secondary branches of which grow in the direction opposite to the movement of fluid flow. The predominant development of second order branches of dendritic crystals in this case makes it possible to fill the volumes of liquid in the intercrystalline space and increase the density of the solid shell. It is shown, that the vertices of the columnar crystals protruding beyond the solidification front break off, dendrite fragments fall into a liquid bath, and the crystals themselves are deformed when colliding with moving equiaxial crystals. In this case, the front line of solidification is aligned, and the emerging crystal structure is compacted. The presence of particles of the solid phase before the solidification front in the columnar crystals growth zone, in turn, under certain conditions helps to accelerate the transition from the columnar crystals zone to the zone of equiaxial crystals.

Keywords

Continuous casting machine (CCM), hardening, continuous cast billet, crystal structure, continuous casting, electromagnetic stirring.