

А. С. Нурадинов, Е. Д. Таранов, А. С. Эльдарханов*

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*Научный центр «Новейшие материалы и технологии», Москва

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИИ НА КИНЕТИКУ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ И СТРУКТУРУ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК

На модельном сплаве камфен изучено влияние вибрации на кинетику и структуру затвердеваия полунепрерывнолитой заготовки. Установлено, меняя место подвода виброимпульса и параметры вибрации, можно управлять формирующейся структурой непрерывнолитых заготовок.

Ключевые слова: *вибрация, сплав, кристаллизация, кинетика, структура, заготовка.*

На модельном сплаві вивчено вплив вібрації на кінетику тверднення та структуру напів-безперервнолітої заготовки. Встановлено, що, змінюючи місце підвода віброімпульса та параметри вібрації, можна управляти формуванням структури безперервнолітих заготовок.

Ключові слова: *вібрація, сплав, кристалізація, кінетика, структура, заготовка.*

In the model alloy camphene studied the effect of vibration on the kinetics and structure continuously preparations is studied. It is established that changing the place of supply vibropulse and vibration parameters can be controlled formative structure billets.

Keywords: *vibration, an alloy, crystallization, kinetics, structure, preparation.*

Кнастоящему времени получены достоверные сведения о положительном влиянии вибрации на измельчение кристаллической структуры, сокращение или полное устранение зоны транскристаллизации за счет роста равноосных кристаллов, снижение зональной и дендритной неоднородности, повышение механических и специальных свойств металлов и сплавов [1, 2].

Исследования формирования кристаллических структур модельных и стальных слитков [3, 4] показали, что **вибрационная обработка стали и сплавов есть, по существу, введение в расплав дополнительной энергии упругих волн.**

Так как воздействие вибрации на затвердевание металлов и сплавов основано на передаче энергии от источника поля в жидкий и кристаллизующийся расплав, то вполне резонно, по мнению авторов работы [5], к описанию таких процессов применить методы термодинамики. В статье [6] энергия внешнего воздействия формализована в виде термодинамической функции свободной энергии Гиббса Ge , обеспечивающая реальную кристаллизацию расплава

$$Ge = 4\pi\sigma_{ж-к}^2 t_0 (r_p - r_n) / (L\Delta t),$$

где $\sigma_{ж-к}$ – межфазная энергия на границе раздела жидкой и твердой фаз; $t_0, \Delta t$ – температура кристаллизации и переохлаждения; r_p и r_n – равновесный и неравновесный критические радиусы сферического зародыша твердой фазы; L – теплота кристаллизации.

Это дало основание авторам [5] с позиций термодинамики выдвинуть гипотезу о механизме влияния энергии внешних воздействий на металлический расплав: при формировании кластерных (предзародышевых, упорядоченных) структур расплава, а затем при образовании и росте из них зародышей в процессе обработки

системы внешним воздействием расход энергии извне возрастает для более плотно упакованных структур, характеризующихся типами кристаллических решеток металлов.

К числу наиболее важных параметров, воздействующих на кристаллизацию сплавов, относят частоту и амплитуду колебаний, которые определяют распределение действующих сил, интенсивность перемешивания расплава, температурный градиент, вязкость металла перед границей затвердевания [7]. Эти параметры способствуют измельчению первичного зерна, равномерному распределению неметаллических включений, повышению качества и механических свойств отливок, слитков и непрерывнолитых заготовок [8].

Многочисленные рекомендации по режимам виброобработки вызваны разнообразным действием этого вида обработки на жидкий и кристаллизующийся металл. Наиболее полное обобщение результатов по измельчению дендритной структуры различных сплавов сделано в работе [9]. Критический порог вибрации при обработке железоуглеродистых и цветных сплавов определяется (по данным [9]), как произведение $\omega \cdot A$ (ω – частота, A – амплитуда колебаний). Установили, что для всех исследуемых систем измельчение структуры на 50 % происходит при $\omega \cdot A \sim 2 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Повышение энергии импульса, частоты и амплитуды колебаний целесообразно только до определенного предела. По данным [10], этот предел при боковой вибрации составляет 15-20 Дж/(с·кг). Дальнейшее увеличение указанной мощности энергетически невыгодно. Оптимальной амплитудой колебаний при подаче импульса через кристаллизатор считают 0,2-0,26 мм.

По мере увеличения частоты вибрации (0-100 Гц) увеличивается число равноосных кристаллов и уменьшается число столбчатых. Такой же эффект достигается по мере увеличения амплитуды вибрации (0-0,5 мм), при этом толщина и размеры зерен с увеличением амплитуды уменьшаются.

В применяемых на практике частотах и амплитудах низкочастотной вибрации время, необходимое для полного перемешивания обрабатываемого объема расплава (1 дм³), составляет 5-30 мин. Это свидетельствует о незначительных скоростях движения всего объема расплава. Однако, скорости перемещения микрообъемов жидкости вдоль фронта кристаллизации могут быть достаточно высокими. Эти перемещения оказывают воздействие на гидродинамические процессы вокруг растущих дендритов и выделившихся на границу затвердевания ликваторов [7].

Наибольшее влияние на измельчение кристаллической структуры заготовок оказывает тип применяемой вибрации. При обработке металлических расплавов применяют в основном три типа вибрации: с ориентацией амплитуды в вертикальной или горизонтальной плоскостях и перемещением волны с круговой амплитудой в горизонтальной плоскости.

При решении проблемы выбора оптимальных параметров виброобработки следует учитывать основные принципы воздействия низкочастотных волн на затвердевающий металл [11-12]:

- при распределении волн в горизонтальном направлении от боковых импульсов главные силы и ускорения воздействуют в вертикальном направлении, вызывая перемещение неметаллических включений к открытой поверхности металла и опускание плавающих кристаллов и центров кристаллизации в донную часть слитка, сокращение глубины лунки жидкого металла;
- вертикальное направление стоячей волны способствует перемещению центров кристаллизации к боковой поверхности слитка, а неметаллических включений – в глубь затвердевающего объема металла;
- центробежная сила при круговой вибрации в горизонтальном направлении перемещает центры кристаллизации к границе затвердевания, а центроостремитель-

ная сила сдвигает неметаллические включения, ликваты и легкоплавкие примеси по направлению к оси слитка; касательное направление скоростного потока по отношению к границе затвердевания способствует обламыванию вершин растущих дендритов;

- кольцевая бегущая волна обеспечивает равномерную обработку по всему сечению слитка.

Вполне очевидно, что выбор оптимальных параметров (частота и амплитуда) вибрации будет зависеть от места подвода виброимпульсов. Поэтому в данной работе на модельном сплаве (камфен) было изучено влияние места приложения и параметров вибрации на кинетику и структуру полунепрерывнолитой заготовки. Заготовки камфена сечением 50x110 мм отливали на физической модели установки полунепрерывного типа. Виброимпульс подводили к кристаллизатору или заготовке под кристаллизатором. Воздействие виброимпульса в обоих случаях осуществлялось в вертикальной плоскости. Частота вибрации составляла 24, 29 и 32 Гц при амплитудах 0,1; 0,5; 1,0 и 2,0 мм. Прозрачные широкие грани модели позволяли замерять параметры фронта кристаллизации по сечению и высоте модели через определенные промежутки времени (2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25 и 30 мин), а также наблюдать и фотографировать формирующуюся кристаллическую структуру заготовки.

Переходя к анализу полученных результатов, следует отметить, что при отсутствии вибрации происходило равномерное продвижение фронта кристаллизации по сечению и высоте заготовки. При наложении вибрации на кристаллизатор или заготовку картина существенно менялась: равномерное продвижение фронта кристаллизации по сечению заготовки происходило до достижения им величины 10-12 мм, а дальше эта величина оставалась практически неизменной в связи с обламыванием вершин столбчатых кристаллов под воздействием вибрации. Что касается количества оседающих в донную часть обломков кристаллов, то оно было незначительным до начала обламывания вершин столбчатых кристаллов. Затем за счет оседания обломков кристаллов с фронта кристаллизации и кристаллов, возникающих в жидкой фазе над фронтом кристаллизации под воздействием вибрации, глубина жидкой лунки заметно уменьшалась. Отмеченные особенности затвердевания заготовок не зависели от места приложения вибрации и ее параметров.

Как видно из приведенных в таблице данных, влияние места подвода виброимпульса на кинетику затвердевания неоднозначно и зависит от параметров вибрации. Так, при амплитудах 0,1 и 0,5 мм и частотах 29 и 32 Гц высота насыпи обломков в донную часть значительно больше в случае наложения вибрации на кристаллизатор. При амплитудах 1 и 2 мм и частотах 24, 29 и 32 Гц, наоборот, количество оседающих обломков больше в случае наложения вибрации на заготовку под кристаллизатором. Описанная картина кинетики фронта затвердевания заготовки обусловлена разной интенсивностью обламывания вершин столбчатых кристаллов и оседания их в донную часть заготовки. Интенсивность же обламывания определяется силой и направлением ударных нагрузок упругих волн, а их энергия, в свою очередь, зависит от соотношения величин параметров вибрации. Наибольший эффект получен при вибрации кристаллизатора с частотой 32 Гц и амплитуде 1 мм и при вибрации заготовки под кристаллизатором с частотой 32 Гц и амплитуде 1 и 2 мм. При этом под воздействием вибрации происходят заметная интенсификация теплообменных процессов и повышение скорости кристаллизации расплава.

Таким образом, проведенные исследования показали принципиальную возможность и целесообразность использования вибрации при непрерывной разливке металлов для управления формирующейся структурой заготовок с целью повышения их механических характеристик и производительности МНЛЗ.

Влияние способа и параметров вибрации на высоту оседающих в донную часть обломков кристаллов, мм

Текущее время, мин	Амплитуда вибрации, мм														
	0			0,1			0,5			1,0			2,0		
	24	29	32	24	29	32	24	29	32	24	29	32	24	29	32
2	7/-	7/-	7/7	7/7	7/7	7/7	7/7	7/7	7/7	7/7	7/7	7/7	7/-	7/-	7/7
4	10/-	10/-	10/9,5	10/9,5	10/9,5	10/9,5	10/9,3	10/9,3	10/9,3	10/9,3	10/9,3	10/9	10/-	10,3/-	9,3/9
6	12/-	12/-	12/11,5	12/11,5	12/11,8	12/11,8	11,8/17	12/30	12/40	12/40	12/40	12,3/-	12/-	12,3/-	11/40
8	14/-	14/-	14/13,5	14/13,8	14/14	17/14,5	14,3/31	14/65	14,5/80	14,5/80	14,5/80	15,5/-	14,5/-	15,5/-	17,5/80
10	16/-	17/-	17/16	18,5/22,5	22/22	32/28,5	18,5/62	29/145	29,5/165	29,5/165	29,5/165	34/-	24,5/-	34/-	29/165
12	18/-	19/-	19/18	31,5/33	43/29	72/38	34,5/105	56/225	63/240	63/240	63/240	63/-	42,5/-	63/-	50/240
15	21/-	22/-	30/23	63/54	113/53	185/65	108/208	215/340	235/340	235/340	235/340	223/-	188/-	223/-	240/340
20	25/-	52/-	74/43	164/145	263/132	405/183	355/310	410/400	420/420	420/420	420/420	408/-	380/-	408/-	415/420
25	60/-	125/-	140/110	203/225	400/198	443/258	413/385	435/420	453/450	453/450	453/450	437/-	415/-	437/-	445/450
30	-/-	165/-	160/150	217/248	413/216	458/280	429/403	446/435	463/460	463/460	463/460	445/-	440/-	445/-	455/460

Примечание: числитель – вибрация приложена к кристаллизатору; знаменатель – к заготовке под кристаллизатором



Список литературы

1. Эльдарханов А. С. Процессы кристаллизации в поле упругих волн. – М.: Металлургия, 1996. – 265 с.
2. Гуревич Я. Б., Леонтьев В. И., Теумин И. И. Влияние упругих колебаний при кристаллизации на структуру, механические свойства и деформируемость стали Х27, Х25Н20 // Проблемы металловедения и физики металлов. – М.: Metallurgizdat, 1959. – Вып. 6. – С. 117-137.
3. Влияние вибрации на кристаллизацию органического слитка / В. Х. Межидов, Х. И. Асхабов, А. С. Эльдарханов, и др. // Влияние внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1983. – С. 35-40.
4. Кристаллизация и структурообразование стальных слитков в условиях вибрационного воздействия / Е. Д. Таранов, А.С. Нурадинов, С.Е. Кондратюк, и др. // Процессы литья. – 1998. – № 3-4. – С. 84-90.
5. Балакин Ю. А., Гладков М. И. Энергоемкость внешнего воздействия на затвердевающий металл с позиций термодинамики // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2001. – № 6. – С. 44-46.
6. Гладков М. И., Балакин Ю. А., Гончаревич И. Ф. Термодинамический анализ условий зарождения и роста кристаллов при виброобработке металла // Там же. – 1989. – № 9. – С. 27-29.
7. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Технологии современной металлургии. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
8. Гладков М. И., Балакин Ю. А. Виброобработка жидкого металла // Литейн. пр-во. – 2000. – № 12. – С. 7-8.
9. Cambell I. // Solidification Technology in the Foundry and Cast House. – London, 1988. – P. 61-64.
10. Серветник В. М., Соляников Б. Г., Носов В. А. Улучшение качества стали ШХ15 путем виброобработки слитков // Сталь. – 1987. – № 4. – С. 48-49.
11. Эльдарханов А. С. Применение физических методов моделирования для изучения влияния вибрации на процессы затвердевания сплавов // Дис. д-ра техн. наук. – Киев, 1996. – 321 с.
12. Балакин Ю. А., Гладков М. И. Расчет параметров вибрационной обработки кристаллизующихся металлов // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2003. – № 9. – С. 56-60.

Поступила 10.05.2012

Вниманию авторов!

Статьи, поступающие в редакцию, должны иметь аннотации и ключевые слова на русском, украинском и английском языках. Объем статьи – не более **10 стр.**, рисунков – не более **5**.

Статьи подаются как на бумажном, так и электронном носителях. Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов – формат **jpeg**. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть черно-белыми, четкими и контрастными.

Статьи в редакции проходят научное рецензирование.