

УДК 621.746.07

Ганин Д.Р.

РАЗВИТИЕ СПОСОБОВ КАЧАНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ УСТАНОВОК НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ МЕТАЛЛА

Аннотация. Рассмотрена история зарождения и развития способов возвратно-поступательного движения (качания) кристаллизаторов, используемых на установках непрерывной разливки стали (УНРС) и машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Приведены сведения о способах качания кристаллизаторов установок непрерывной разливки металла (УНРМ), в том числе об используемых в них технических параметрах (закон качания, амплитуда, частота, время опережения). Рассмотрено и проанализировано влияние параметров законов качания кристаллизаторов УНРС на качество поверхности непрерывнолитых заготовок.

Приведены критерии оптимальности выбора режимов движения кристаллизаторов для конкретных случаев (время опережения и другие) с целью обеспечения необходимых требований стабильности литья и качества поверхности непрерывнолитой заготовки.

Ключевые слова: УНРМ, УНРС, МНЛЗ, закон качания, способ качания, возвратно-поступательное движение кристаллизатора, непрерывное литье

Постановка проблемы

Для исключения зависания формирующейся корки слитка на рабочих стенках кристаллизатора в результате сопротивления при его вытягивании, вызванного ферростатическим давлением и прилипанием к стенкам жидкого металла, на подавляющем большинстве УНРМ применяют периодическое возвратно-поступательное движение (качание) кристаллизатора вдоль движения слитка с заданной амплитудой и частотой либо периодическое перемещение слитка с остановками или перемещением в обратном направлении на определенную величину, например при разливке некоторых цветных металлов и на горизонтальных УНРМ [1]. Известно влияние качания кристаллизатора УНРМ на затвердевание и качество формирующихся слитков и заготовок, получающихся из них при прокатке [2].

Оптимальным режимом разливки является тот, который наилучшим образом удовлетворяет требованиям стабильности литья и качества поверхности заготовки, обеспечивает необходимое время опережения при максимальной частоте и минимальной амплитуде качания при прочих равных условиях (тип УНРМ, марка разливаемого металла, форма и размеры поперечного сечения заготовки, режим охлаждения в кристаллизаторе, скорость вытягивания слитка и др.). Параметры качания кристаллизатора (закон качания, частота, амплитуда, время опережения (время, характеризующее продолжительность проскальзывания кристаллизатора относительно вытягиваемой заготовки при движении вниз) в оптимальном режиме считаются оптимальными.

Вопрос выбора оптимального режима качания кристаллизатора для конкретного способа непрерывной разливки не является решенным. В связи с этим актуальны изучение истории развития законов качания кристаллизаторов УНРМ, а также анализ влияния

основных параметров этих законов на качество непрерывных слитков с целью выявления критериев оптимальности выбора режимов качания кристаллизаторов УНРМ для конкретных случаев.

Основная часть

При освоении непрерывной разливки, когда кристаллизаторы были стационарными, наблюдались частые «зависания» корки слитка на их стенках при отрыве ее верхней тонкой части от движущегося слитка из-за трения о стенки кристаллизатора. Происходили «прорывы» металла под кристаллизатором с аварийной остановкой разливки. Литье в такой кристаллизатор не обеспечивало высоких скоростей вытягивания заготовки, а в случае зависаний слитка при этом способе было невозможно управлять разливкой. Для исключения этого явления кристаллизатор должен периодически двигаться вниз вместе со слитком.

В 1913 г. осуществить возвратно-поступательное движение кристаллизатора предложил А.Г. Персон, разработав способ и устройство для непрерывной разливки трубообразных изделий [3].

В 1933 г. придавать возвратно-поступательное движение кристаллизатору предложил З. Юнгханс [3-5]. Слиток транспортировался вниз с такой же скоростью, как и кристаллизатор, а обратное перемещение кристаллизатора в исходное положение осуществлялось преимущественно с увеличенной скоростью. Цикл предусматривал качание кристаллизатора с амплитудой 30-40 мм вниз со скоростью слитка, вверх – в три раза быстрее. По этому способу разливались латунь, алюминий и его сплавы. Для отлитого по способу З. Юнгханса стального слитка было характерно наличие поверхностных пороков – «колец» с шероховатой поверхностью, расстояние между которыми соответствовало пути, проходимому слитком во время равномерного возвратного движения кристаллизатора. Ширина «кольца» зависела от условий литья и времени возвратного перемещения кристаллизатора. Для устранения этих недостатков повышали скорость

возвратного перемещения кристаллизатора, чтобы сократить время движения слитка и кристаллизатора навстречу друг другу. Но «кольца» получались ярко выраженными и качество поверхности ухудшалось. Недостатками цикла также были частые зависания слитка, резкие изменения режима движения в крайних положениях кристаллизатора и сложная профилировка кулачка, на который он опирается.

Братья Мясоедовы предложили цикл, заключающийся в опускании со скоростью слитка кристаллизатора на величину $3/4$ его хода, ускоренном движении кристаллизатора со скоростью, превышающей в два раза скорость слитка и последующем подъеме кристаллизатора со скоростью в два раза большей скорости слитка [6, 7]. В этом случае вначале происходит «залечивание» оболочки, а потом срыв прилипания с сжатием оболочки, без ее разрушения.

В 1940 г. Ф. Жакке предложил слиток перемещать периодически, с остановками, за время которых увеличивается толщина корки слитка и устраняются ее разрывы, а кристаллизатор оставить неподвижным [2].

Затем в 1953 г. на УНРС в Бэрроу для периодической разгрузки оболочки слитка при движении кристаллизатора вниз было применено отрицательное скольжение (рис. 1) [8], то есть кристаллизатору сообщали опережающее движение по отношению к слитку. При скорости движения кристаллизатора вниз, несколько превышающей скорость движения слитка, возникало скольжение слитка относительно стенок кристаллизатора, препятствующее привариванию непрерывной заготовки к стенкам. В результате, когда кристаллизатор возвращался вверх, уменьшались возникающие в корке напряжения. На корку слитка при движении вниз действовали сжимающие силы, способствующие устранению разрывов корки. При попытках литья с положительным скольжением часто возникали прорывы жидкого металла под кристаллизатором. При движении кристаллизатора с опережением срыв прилипания корочки металла к стенкам кристаллизатора происходил без разрушения оболочки, при ее сжатии. Поэтому этот способ возвратно-поступательного движения кристаллизатора значительно уменьшал склонность к образованию прорывов металла.

После применения отрицательного скольжения время опережения, характеризующее продолжительность проскальзывания кристаллизатора относительно вытягиваемой заготовки и оказывающее влияние на глубину складок качания (от чего косвенно зависит образование дефекта поверхности «поперечная трещина по складке качания»), стало считаться критерием стабильности литья и качества поверхности слитков.

В 1959 г. в СССР на двух МНЛЗ Новолипецкого металлургического завода был внедрен получивший широкое распространение синусоидальный закон качания кристаллизатора [9], в котором на определенном отрезке времени кристаллизатор опережает слиток, то есть в цикле есть период уплотнения корочки слитка

(рис. 2). Использование этого закона позволило упростить привод механизма качания кристаллизатора.

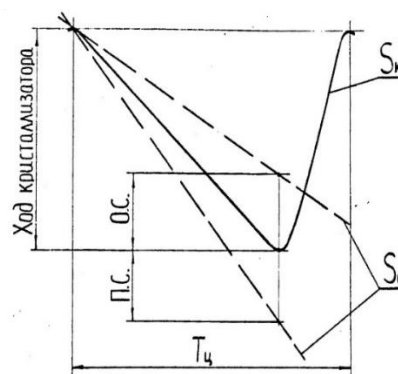


Рис. 1. Схема возвратно-поступательного движения кристаллизатора с отрицательным (о.с.) и положительным (п.с.) скольжением [8]:

S_k – перемещение кристаллизатора;
 $S_{сл}$ – перемещение слитка; $T_{ц}$ – период качания

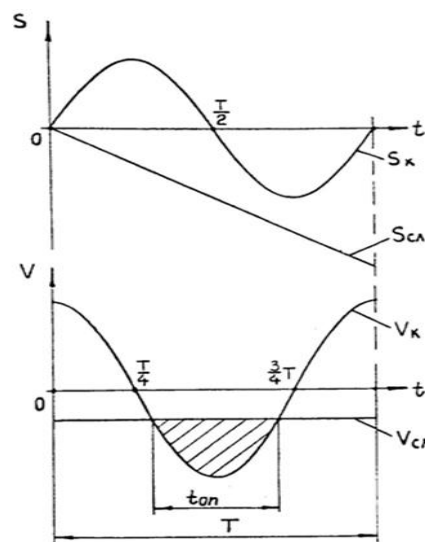


Рис. 2. Синусоидальный закон движения кристаллизатора [8]:

$S_{сл}$ – перемещение слитка; T – период качания,
 $t_{оп}$ – время опережения

Параметры возвратно-поступательного движения кристаллизатора по синусоидальному закону определяются следующими выражениями:

$$S = A \sin(\omega t + 2\pi);$$

$$v = \frac{dS}{dt} = \omega A \cos(\omega t + 2\pi);$$

$$a = \frac{d^2S}{dt^2} = -\omega^2 A \sin(\omega t + 2\pi),$$

где S, v, a – соответственно перемещение, скорость, ускорение кристаллизатора; A – амплитуда перемещения; ω – круговая частота колебаний.

В синусоидальном законе качания кристаллизатора время опережения определяется из соотношения

$$\tau_o = \frac{1}{f} \left[1 - \frac{1}{\pi} \arccos \left(-\frac{v_c}{2\pi f A} \right) \right],$$

где f – частота колебаний;

v_c – скорость вытягивания слитка;

A – амплитуда качаний кристаллизатора.

При синусоидальном законе качания кристаллизатора частота качания зависит от скорости вытягивания заготовки и может составлять 0–400 циклов в минуту; амплитуда зависит от типа отливаемой заготовки и находится в диапазоне 3–9 мм [10] (по другим данным – в пределах 2,0–5,5 мм [11]).

Время опережения обычно изменяется в диапазоне 0,1–0,3 с [11]. В работе Колпакова С.В. для сталей приведены величины $[\tau_o] = 0,25–0,30$ с [12], а в работе Передреева Д.В. – $[\tau_o] = 0,10–0,15$ с [13]. Для малоуглеродистых сталей с содержанием углерода менее 0,14% время опережения должно быть больше или равно 0,10–0,12 с; для среднеуглеродистых и низколегированных сталей с содержанием углерода до 0,14% – 0,1–0,2 с; для среднеуглеродистых сталей с содержанием углерода больше 0,16% – 0,15–0,20 с; для нержавеющей сталей типа Х18Н9Т – 0,05–0,10 с [14, 15]. Для высокоскоростных сортовых МНЛЗ величина времени опережения выбирается на уровне 0,12–0,14 с.

Малые значения времени опережения в значительной мере снижают поступление ШОС в зазор между стенками кристаллизатора и коркой слитка, нарушая стабильность литья.

С другой стороны, для снижения глубины следов качания необходимо уменьшать время опережения слитка за счет увеличения частоты и уменьшения амплитуды качания кристаллизатора.

Методика определения оптимальных параметров синусоидального закона дана Лебедевым В.И. и Евтевым Д.П. в работе [16], где для получения максимальной скорости вытягивания при минимальной амплитуде качания рекомендуется частота 65 мин⁻¹. Авторы без теоретического и экспериментального обоснования предлагают определять амплитуду качания A в зависимости от скорости движения слитка V_c по формуле

$$A = 0,22V_c.$$

В работе Кобелева В.А. [17] также приведена методика определения оптимальных параметров синусоидального закона качания, но в качестве необходимого времени опережения необоснованно принимаются значения из диапазона 0,5–1,0 с, а в качестве оптимальных частот диапазон, равный 16–32 мин⁻¹ и практически неиспользуемый на современных УНРС.

Особенностью трапецеидального закона качания кристаллизатора является возможность обеспечить большее время опережения. Этому закону свойствен-

ны резкие изменения режима движения в крайних положениях кристаллизатора и большие ускорения, вызывающие значительные динамические нагрузки на привод механизма качания, что ограничивает повышение частоты качания. Различные циклы трапецеидального закона качания осуществляют с помощью кулачков, а привод может быть механическим или гидравлическим. Существуют три основных цикла трапецеидального закона качания кристаллизатора: 1) время хода кристаллизатора вверх меньше времени его хода вниз (рис. 3); 2) время хода кристаллизатора вверх больше времени его хода вниз (рис. 4); 3) время хода кристаллизатора вверх равно времени хода кристаллизатора вниз.

В 50–60-е гг. наибольшее распространение получил трапецеидальный закон качания кристаллизатора с циклом Юнгханса-Росси (1:3) [18]. В этом цикле кристаллизатор 3/4 времени цикла движется вниз синхронно со слитком, а затем быстро (в течение 1/4 времени цикла) возвращается в исходное положение (рис. 5). На рис. 3, 4 приняты следующие обозначения: t_b – время хода кристаллизатора вверх; t_n – время хода кристаллизатора вниз; $m = t_b/t_n$ – коэффициент цикла; τ_1, τ_2 – время положительного скольжения соответственно в начале и в конце хода кристаллизатора вниз; t_1, t_2 – время равноускоренного и равнозамедленного движения кристаллизатора при ходе вверх (для цикла $m \leq 1$) или вниз (для цикла $m \geq 1$); V_b, V_n – максимальные скорости движения кристаллизатора соответственно при его ходе вверх и вниз; $V_{сл}$ – скорость вытягивания слитка; $t_{оп}$ – время опережения.

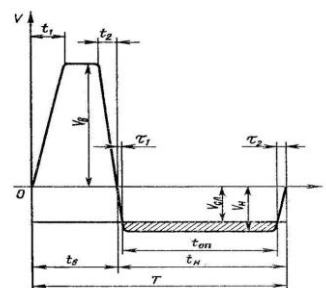


Рис. 3. График скоростей кристаллизатора и слитка при цикле трапецеидального закона [18]: $m < 1$

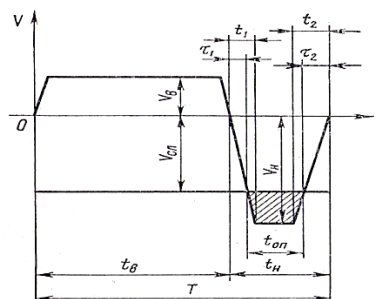


Рис. 4. График скоростей кристаллизатора и слитка при цикле трапецеидального закона [18]: $m > 1$

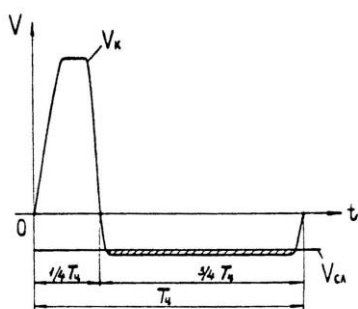


Рис. 5. Трапецеидальный закон качания кристаллизатора с циклом Юнгханса-Росси (цикл 1:3) [18]

При использовании трапецеидального закона во время движения кристаллизатора вверх при наибольших изменениях относительной скорости между кристаллизатором и слитком и наибольших напряжениях по возможности поддерживают низкими ускорение и замедление. При движении кристаллизатора вниз ускорение и замедление должны быть высокими, так как изменение скорости кристаллизатора уменьшает возникающие в слитке напряжения. После успешного использования в Бэрроу цикла качания кристаллизатора 1:3 с отрицательным скольжением он был рекомендован как наиболее целесообразный при высокоскоростной разливке. Также был испытан цикл 3:1 (рис. 6), получаемый реверсированием кулачка. В этом цикле, несмотря на уменьшение времени опережения в три раза, его было достаточно, чтобы процесс литья был стабильным.

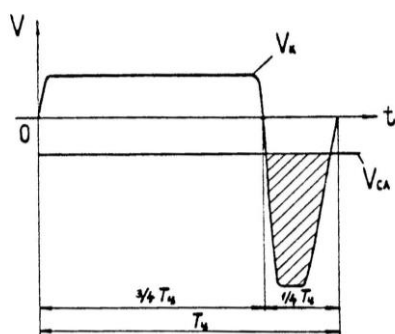


Рис. 6. Трапецеидальный закон качания кристаллизатора с циклом Юнгханса-Росси (цикл 3:1) [18]

По данным А.М. Энгояна и В.М. Шусторовича, для данного закона время опережения должно составлять 0,15–0,18 с [19]. На разных МНЛЗ трапецеидальный закон осуществляли с ходом кристаллизатора, равным 9,5–50 мм, и частотой качания 37,5–50 мин⁻¹ [18]. Закону свойственны большие ускорения, вызывающие значительные динамические нагрузки на привод качания [19].

В работе [18] разработана методика определения оптимальных параметров трапецеидального закона

качания кристаллизатора, установлен критерий оптимального опережения для различных циклов трапецеидального закона и доказывается, что мнение, что цикл Юнгханса-Росси наиболее эффективен при высокоскоростной разливке, ошибочно. Рациональное использование циклов с $m < 1$ ограничивается имеющимися при этом место ускорениями кристаллизатора. В цикле Юнгханса-Росси (1:3) динамические нагрузки как минимум в девять раз выше, чем в цикле 3:1.

По мнению автора работы [18], наиболее целесообразным, особенно при высокоскоростной разливке, является применение синусоидального закона и циклов трапецеидального закона, имеющих коэффициент цикла $m \geq 1$.

Максимальным приближением к трапецеидальному графику скорости является трехсинусоидальный закон движения кристаллизатора, получаемый путем сложения нескольких синусоидальных движений [20, 21], например по уравнению

$$Y = A_1 \sin \omega t + A_2 \sin 2\omega t + A_3 \sin 3\omega t, \quad (7)$$

где A_1, A_2, A_3 – амплитуды колебаний;
 ω – круговая частота;
 t – время.

График скорости кристаллизатора при таком законе движения представлен на рис. 7. Трехсинусоидальный закон движения лучше синусоидального по отношению времени «залечивания» t_3 к продолжительности цикла $T_{ц}$: при трехсинусоидальном $t_3/T_{ц} = 0,5$, а при синусоидальном $t_3/T_{ц} = 0,27$.

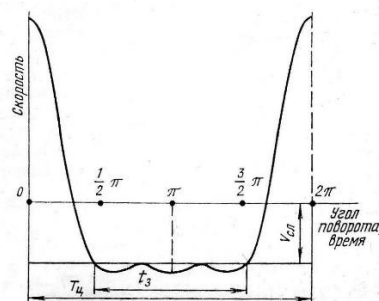


Рис. 7. График скорости кристаллизатора при трехсинусоидальном законе движения [20]

Ускорение при трехсинусоидальном законе качания получается более высоким. Динамические нагрузки на привод механизма качания, возникающие при использовании этого закона, в семь раз выше, чем при синусоидальном. Трехсинусоидальный закон качания кристаллизатора может быть выполнен с помощью кривошипно-шатунного механизма с балансирами.

Известны и другие законы качания кристаллизатора, которые не были опробованы в промышленности [22-26].

На заводе фирмы «Armco» используется практика инвертированного регулирования частоты, когда

амплитуда качания кристаллизатора увеличивается, а частота уменьшается с увеличением скорости разливки (рис. 8.) [27]. В этом случае поддерживается малое и относительно постоянное время движения заготовки с отставанием по отношению к движению кристаллизатора в стабильном интервале качания. Время движения заготовки с опережением по отношению к движению кристаллизатора в процессе его качания при этом увеличивается. В случае повышения скорости разливки при движении заготовки с опережением по отношению к движению кристаллизатора обеспечивается усиленный расход ШОС там, где это необходимо более всего.



Рис. 8. Инвертированный (а) и стандартный (б) режимы качания кристаллизатора [27]: 1 – положительный шаг; 2 – отрицательный шаг

При режиме инвертированного качания поддерживается почти постоянное время отрицательного шага с целью регулирования глубины следа на слитке от качания, причем рост длительности положительного шага при увеличении скорости разливки ведет к росту расхода ШОС (рис. 9).



Рис. 9. Длительность положительного (1) и отрицательного (2) шага для режима инвертированного (а) и обычного (б) качания кристаллизатора [27]

На первых этапах освоения непрерывного литья возвратно-поступательное движение кристаллизатора осуществлялось простыми рычажными механизмами. На вертикальных МНЛЗ кристаллизатор перемещался

в скользящих или роликовых направляющих. На криволинейных МНЛЗ наибольшее применение получил механизм качания параллелограммного типа. До последнего времени основным типом применяющегося механизма качания являлся шарнирный четырехзвеновик с подшипниками качения. Вмятины на дорожках качения колец подшипников, износ приводили к отклонениям движения кристаллизатора от заданной траектории, что снижало стойкость кристаллизатора, стабильность литья, качество поверхности отливки. Появление гидравлических механизмов качания кристаллизатора (в 1995 г. на заводе фирмы «Агтсо» гидравлического устройства качания кристаллизатора «Dinaflex» фирмы «VAI»; в 1999 г. в ОАО «Северсталь» бесшарнирного рессорного механизма качания с гидравлическим приводом ОАО «МК ОРМЕТ-ЮУМЗ», ООО «КОРАД», ОАО «СКБ ПА» (г. Ковров) и др.) дало возможность реализовать любые конфигурации законов качания кристаллизатора, в том числе несинусоидальные (асимметричные) режимы качания (рис. 10), позволяющие более плавно полностью динамически регулировать параметры качания при изменениях в процессе разливки; оперативно устанавливать при изменении технологического процесса новый режим работы кристаллизатора; минимизировать время опережения (что снижает время воздействия сжимающих нагрузок на корочку заготовки); не менее чем на 30% снизить глубину следов качания (в сравнении с синусоидальным законом); существенно повысить скорость разливки и улучшить качество поверхности и подповерхностных слоев заготовки [28].



Рис. 10. Графики изменения скорости движения кристаллизатора для синусоидального и несинусоидального закона с частотой цикла 2 Гц [28]

В работе [29] изучено влияние силы трения в кристаллизаторе при синусоидальном и несинусоидальных законах качания кристаллизатора. Экспериментально установлено, что фактическая величина опережения кристаллизатора при несинусоидальном качании на 40% выше, чем при синусоидальном. Это способствует лучшему «залечиванию» поверхностных трещин и хорошему отделению оболочки слитка от стенок кристаллизатора, уменьшает склонность к образованию и распространению трещин, улучшает качество поверхности заготовки. С помощью несинусоидальных режимов качания можно реализовывать

меньшее время опережения, при котором образуются неглубокие складки качания шириной около 250 мкм за счет уменьшения времени воздействия сжимающих нагрузок на корочку слитка [30].

Результаты и обсуждение

Для обеспечения стабильности процесса литья и получения поверхности непрерывного слитка высокого качества конструкция механизма качания кристаллизатора должна обеспечивать точное воспроизведение заданного закона качания. Этим требованиям удовлетворяет гидравлический механизм качания кристаллизатора.

Оптимальный режим качания кристаллизатора (закон качания, частота, амплитуда и время опережения) должен наилучшим образом удовлетворять требованиям стабильности литья и качества поверхности заготовки. Одним из основных критериев стабильности литья и качества поверхности непрерывного слитка является время опережения. Время опережения оказывает влияние на глубину складок качания, что косвенно влияет на образование дефекта поверхности «поперечная трещина по складке качания».

Режим качания оказывает влияние на оптимальный расход ШОС в кристаллизатор, силу трения между заготовкой и стенками кристаллизатора (в зависимости от содержания углерода, кремния и марганца в разливаемой стали, вязкости шлака, толщины гарнисажа), усилие вытягивания заготовки и качество поверхности слитка. Для стабильности процесса литья и получения поверхности непрерывного слитка высокого качества конструкция механизма качания кристаллизатора должна обеспечивать точное воспроизведение заданного закона качания. Оптимальный расход ШОС зависит от амплитуды и частоты качаний кристаллизатора, скорости разливки, времени опережения, вязкости жидкого шлака и других параметров [28, 31-37] и может определяться зависимостями:

$$Q_n = \frac{0,7}{(\eta^{0,5} \cdot V_p)},$$

$$Q_n = \frac{0,55}{(\eta^{0,5} \cdot V_p)},$$

$$Q_n = \frac{0,6}{(\eta \cdot V_p)};$$

– для сталей [C]<0,08%:

$$Q_s = 0,4 \cdot \left(\frac{1}{A^{0,3}}\right) \cdot \left(\frac{60}{f}\right) (\eta \cdot V_p^2)^{0,5} + 0,22;$$

– для сталей 0,08%<[C]<0,16%:

$$Q_s = 0,74 \cdot \left(\frac{1}{A^{0,3}}\right) \cdot \left(\frac{60}{f}\right) (\eta \cdot V_p^2)^{0,5} + 0,17;$$

$$Q_s = \frac{k \cdot \beta}{T_{sol}^{1,6} \cdot \eta^{0,5}} \cdot \frac{A^{0,4}}{V_p} \cos^{-1} \left(\frac{1000 \cdot V_p}{2\pi \cdot f \cdot A} \right);$$

$$Q_s = \frac{0,015 \cdot f \cdot \tau_o}{\eta^{0,5} \cdot V_p},$$

где Q_n – расход ШОС, кг/м²;

f – частота качаний кристаллизатора, Гц;

A – амплитуда качаний кристаллизатора, мм;

η – вязкость жидкого шлака, П (пуаз);

V_p – скорость разливки, м/мин;

T_{sol} – температура затвердевания, К;

τ_o – время опережения заготовки кристаллизатором, с;

k, β – коэффициенты.

В свою очередь, время опережения, кроме режима движения кристаллизатора, зависит от марки стали и ее перегрева, используемых ШОС, влияющих на трение между слитком и кристаллизатором, конструкции кристаллизатора (правильно профилированный, хорошо охлаждаемый кристаллизатор обеспечивает равномерное и эффективное охлаждение поверхности слитка и высокую прочность его корки). Малые значения времени опережения в значительной мере снижают поступление ШОС в зазор между стенками кристаллизатора и коркой слитка, нарушая стабильность литья. С другой стороны, для снижения глубины следов качания необходимо уменьшать время опережения слитка за счет увеличения частоты качания и уменьшения амплитуды качания кристаллизатора.

На качество поверхности слитка влияет сила трения между заготовкой и стенками кристаллизатора. Зависимость усилия трения оболочки слитка о стенки кристаллизатора от вязкости шлака может быть описана эмпирическим соотношением [11]:

$$F_{max} = \frac{\eta_{1300}^v}{\delta \left[\frac{\pi N}{200} + \frac{\pi}{2} + 1 \right]},$$

где δ – толщина шлакового зазора (гарнисажа), м;

N – степень опережения кристаллизатора, с;

v – средняя скорость вытягивания слитка, м/с.

В результате качания кристаллизатора на поверхности заготовки формируются поперечные углубления в виде складок, располагающиеся примерно на одинаковом расстоянии друг от друга. При синусоидальном законе качания кристаллизатора с постоянной амплитудой расстояние h , мм, между складками определяется зависимостью [11, 28]

$$h = \frac{v}{f},$$

где v – скорость разливки, мм/мин;

f – частота качания кристаллизатора, мин⁻¹.

Расстояние между складками пропорционально скорости вытягивания слитка и уменьшается при увеличении частоты качания.

Важным параметром оптимизации закона качания кристаллизатора является глубина проникновения складок качания d_c , которая может колебаться от нескольких десятых долей миллиметра до 1,5–2,0 мм и более.

Более высокая скорость разливки приводит к образованию менее глубоких складок качания. Глубина складок качания снижается с уменьшением величины интервала между складками и с увеличением частоты качания кристаллизатора.

При применении несинусоидальных законов качания (см. рис. 6, 8) в пределах одного цикла качания время движения кристаллизатора вверх больше, чем время движения вниз, поэтому время движения кристаллизатора с опережением больше чем при движении по синусоидальному закону; увеличивается расход ШОС и уменьшается сила трения между заготовкой и кристаллизатором; во время движения с отставанием снижена скорость движения кристаллизатора относительно затвердевшей корочки слитка и, соответственно, снижается растягивающее воздействие на оболочку формирующегося слитка; во время движения с опережением относительная скорость, наоборот, увеличивается, и в это время растет сжимающая сила, действующая на оболочку слитка. Увеличение амплитуды качания способствует увеличению расхода ШОС, а увеличение частоты качаний позволяет значительно снизить расход ШОС.

Для каждого конкретного случая оптимальный режим движения кристаллизатора должен выбираться в соответствии с: маркой разливаемой стали; типом УНРС; видом механизма качания кристаллизатора; формой и размерами поперечного сечения заготовки; конструкцией кристаллизатора; маркой, расходом и вязкостью ШОС; экспериментальными данными замеров сил трения при различных марках ШОС (в зависимости от расхода ШОС, амплитуд и частот качания кристаллизатора, скоростей и других параметров разливки) и сведениями о качестве поверхности заготовки.

Выводы

1. Для стабильности процесса литья и получения поверхности непрерывного слитка высокого качества конструкция механизма качания кристаллизатора должна обеспечивать точное воспроизведение заданного закона качания.

2. Оптимальный режим качания кристаллизатора должен наилучшим образом удовлетворять требованиям стабильности литья и качества поверхности заготовки, одним из основных критериев которых является время опережения, влияющее на глубину складок качания и образование дефекта поверхности «поперечная трещина по складке качания». Несинусоидальные законы качания кристаллизатора обеспечи-

вают большее время опережения, увеличение расхода ШОС, снижение силы трения между слитком и кристаллизатором, высокое качество поверхности слитка.

3. Оптимальный режим движения кристаллизатора для каждого конкретного случая должен выбираться в соответствии с: маркой разливаемой стали; типом УНРС; видом механизма качания кристаллизатора; формой и размерами поперечного сечения заготовки; конструкцией кристаллизатора; маркой, расходом и вязкостью ШОС; экспериментальными данными замеров сил трения при различных марках ШОС (в зависимости от расхода ШОС, амплитуд и частот качания кристаллизатора, скоростей и других параметров разливки) и сведениями о качестве поверхности заготовки.

Список литературы

1. Машиностроение. Энциклопедия. Машины и агрегаты металлургического производства. Т. IV-5 / Н.В. Пасечник, В.М. Сеницкий, В.Г. Дрозд [и др.]; под общ. ред. В.М. Сеницкого, Н.В. Пасечника. М.: Машиностроение, 2004. 912 с.
2. Бровман М.Я. Кристаллизаторы установок непрерывного литья металлов. М.: Теплотехник, 2011. 432 с.
3. Шварцмайер В. Непрерывная разливка: Развитие и применение. М.: Металлургиздат, 1962. 386 с.
4. Deutsches Reichs Patent No 750301, B22D 11/04. Verfahren und Vorrichtung zum Giessen von Metallsträngen / Siegfried Junghans. Заявл. 20.10.1933; опубл. 15.01.1945.
5. Бойченко М.С. Непрерывная разливка стали. М.: ГНТИЛ по черной и цветной металлургии, 1957. 236 с.
6. Мясоедов Ал.Н., Мясоедов Арк.Н. Получение непрерывного слитка методом прямоточной кристаллизации по способу братьев Мясоедовых А.Н. и А.Н. // Цветные металлы. 1939. № 10-11.
7. Бровман М.Я. Непрерывная разливка металлов. М.: ЭКОМЕТ, 2007. 484 с.
8. Кузнецов Б.Г. Исследование механизма взаимодействия кристаллизатора со слитком и разработка рекомендаций по усовершенствованию основных узлов МНЛЗ: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.04. М.: ВНИИметмаш; ЦНИИчермет, 1979. 235 с.
9. Нисковских В.М., Карлинский С.Е., Беренов А.Д. Машины непрерывного литья слывовых заготовок. М.: Металлургия, 1991. 270 с.
10. Основы металлургического производства / под общ. ред. В.М. Колокольцева. СПб.: Лань, 2017. 616 с.
11. Куклев А.В., Лейтес А.В. Практика непрерывной разливки стали. М.: Металлургиздат, 2011. 432 с.
12. Усовершенствование методики изучения механизма образования наружных трещин в непрерывнолитых слябах / С.В. Колпаков, В.М. Кукарцев, В.И. Уманец, А.В. Лейтес // Непрерывное литье стали. № 6. 1979. С. 43-45.

13. Петреев Д.В. Влияние зазоров в механизме качания кристаллизатора на время опережения // *Сталь*. 2007. № 4. С. 67-69.
14. О синхронизации частоты качания кристаллизатора и скорости движения слитка УНРС / Е.В. Сурин, М.Я. Бровман, Ю.П. Бойко и др. // *Сталь*. 1972. № 7. С. 35.
15. Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Ячиков И.М. Непрерывная разливка стали. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 540 с.
16. Лебедев В.И., Евтеев Д.П. Оптимальные параметры синусоидального закона возвратно-поступательного движения кристаллизатора // *Сталь*. 1973. № 4. С. 315-317.
17. Кобелев В.А. Условия применимости синусоидального закона качания кристаллизатора УНРС // *Сталь*. 1967. № 6. С.503-506.
18. Энгоян А.М. Разработка, исследование и внедрение новых режимов качания кристаллизатора МНЛЗ, обеспечивающих повышение стабильности процесса непрерывного литья: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.04 / ВНИИметмаш. М., 1983. 237 с.
19. Энгоян А.М., Целиков А.А., Смоляков А.С. Расчет и анализ оптимальных параметров трапецеидального закона качания кристаллизатора // *Новое в создании металлургических машин: науч. тр. ВНИИметмаш. М.: ВНИИметмаш, 1985. С. 70-81.*
20. Дюдкин Д.А. Качество непрерывнолитой стальной заготовки. Киев: Техника, 1988. 252 с.
21. Левин М.З., Пироженко Н.Г., Дюдкин Д.А. Об оптимальных параметрах синусоидального графика движения кристаллизатора машин непрерывного литья заготовок // *Сталь*. 1975. № 2, С. 123-124.
22. А.с. 383519 СССР, В22D 11/04. Способ перемещения кристаллизатора при непрерывной разливке / С.В. Радиллов, В.П. Локтионов, В.И. Уманец, заявл. 09.03.1970, № 1415871/22-2; опублик. 17.08.1973, Бюл. № 24, 1973.
23. Пат. 2378083 РФ, МПК В 22 D 11/051. Способ непрерывной разливки стали / Паршин В.М., Гончаревич И.Ф., Куклев А.В., Айзин Ю.М., Ганин Д.Р.; заявитель и патентообладатель ЗАО «КОРАД» – № 2008140037/02; заявл. 09.10.2008, опублик. 10.01.2010. Бюл. № 1.
24. Пат. 2378084 РФ, МПК В 22 D 11/051. Способ непрерывной разливки стали / Куклев А.В., Паршин В.М., Гончаревич И.Ф., Ганин Д.Р., Айзин Ю.М.; заявитель и патентообладатель ЗАО «КОРАД» – № 2008140038/02; заявл. 09.10.2008, опублик. 10.01.2010. Бюл. № 1.
25. Пат. 2422239 РФ, МПК В 22 D 11/051. Способ непрерывной разливки стали / Айзин Ю.М., Куклев А.В., Гончаревич И.Ф., Ганин Д.Р.; заявитель и патентообладатель ЗАО «КОРАД» - № 2010104068/02; заявл. 09.02.2010, опублик. 27.06.2011. Бюл. № 18.
26. Пат. 2428274 РФ., МПК В 22 D 11/051. Способ непрерывной разливки стали / Куклев А.В., Айзин Ю.М., Лонгинов А.М., Ганин Д.Р., Гончаревич И.Ф.; заявитель и патентообладатель ЗАО «КОРАД» – № 2008140037/02; заявл. 16.11.2010, опублик. 10.09.2011. Бюл. № 25.
27. Лякишев Н.П., Шалимов А.Г. Развитие технологии непрерывной разливки стали. М.: ЭЛИЗ, 2002. 208 с.
28. Смирнов А.Н., Куберский С.В., Штепан Е.В. Непрерывная разливка стали. Донецк: ДонНТУ, 2011. 482 с.
29. Zang X., Wang X., Wan I. Investigation of Friction Force between Mould and Strand Shell under Sinusoidal and Non-sinusoidal Oscillation in Continuous Slab Casting // *Steel Research - International*. 2008. 79(7). P. 564-568. DOI:10.2374/SRI07SP098-79-2008-56.
30. Антыкуз О.В. Усовершенствование несинусоидального режима качания кристаллизатора слябовой МНЛЗ // *Сборник научных трудов ДонГТУ*. 2013. № 40. С. 116-122.
31. Анисимов К.Н. Создание шлакообразующих смесей для непрерывной разливки слябовых заготовок на основе оценки их физико-химических параметров, обеспечивающих получение качественной продукции: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02. [Место защиты: Центр. науч.-исслед. ин-т технологии машиностроения]. М.: 2018, 151 с.
32. Wolf M.M. The free meniscus problem // *Steel Times International*. 1992. Vol. 16. No. 2. P. 37-38.
33. Wolf M.M. History of continuous casting: 75th Steelmak. Conference Proceedings (Toronto, USA, 1992). Vol. 75. P. 183-187.
34. Ogbayashi S. et.al. Mould powder technology for continuous casting of low carbon aluminium-killed steel // *Nippon Steel Technical Report*. 1987. No. 34. P. 1-10.
35. Kwon O.et. al. Optimization of mould oscillation pattern fir the improwemtnnt of surface quality and lubrication in slab continuous casting: ISS Steelmak. Conf. Prcc 1991. Vol. 74. P.561-568.
36. Tsutsumi K. et. al. Estimation of mold powder consumption in continuous casting // *Tetsu-to-Hagane*. 1998. Vol. 84. No. 9. P. 617-624.
37. Maeda H.et. al. Melting and consumption of mold powder // *CAMP-ISIJ*. 1993. Vol. 6. No. 1. P. 290-281.

Сведения об авторах

Ганин Дмитрий Рудольфович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал ФГАУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Новотроицк, Россия. E-mail: dmargin@mail.ru

DEVELOPMENT OF METHODS OF ROCKING MOLDS IN CONTINUOUS METAL CASTING PLANT

Ganin Dmitry R. – Ph.D., Associate Professor of the Department of Metallurgical Technologies and Equipment, Novotroitsk Branch of the Federal State Autonomous Institution of Higher Education “National Research Technological University “MISiS”, Novotroitsk, Russia. E-mail: dmrgan@mail.ru

Abstract. *The history of the origin and development of the methods of reciprocating motion (rocking) of molds used in steel continuous casting plants (UNRS) and continuous casting machines (CCM) is considered. Information is given on the methods of rocking the molds of continuous casting plants (UNRM), including the technical parameters used in them (rocking law, amplitude, frequency, lead time). The influence of the parameters of the rocking laws of the UNRS molds on the quality of the surface of continuously cast billets is considered and analyzed.*

Criteria are given for the optimal choice of mold motion modes for specific cases (advance time, etc.) in order to ensure the necessary requirements for casting stability and the quality of the surface of a continuously cast billet.

Keywords: *UNRM, UNRS, CCM, rocking law, rocking method, mold reciprocating motion, continuous casting*

Ссылка на статью:

Ганин Д.Р. Развитие способов качания кристаллизаторов установок непрерывной разливки металла // Теория и технология металлургического производства. 2023. №3(46). С. 10-18.

Ganin D.R. Development of methods of rocking molds in continuous metal casting plant. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2023, vol. 46, no. 3, pp. 10–18.