

*к.т.н. Антыкуз О.В.
(ДонНТУ, г. Донецк, Украина, antykuz@i.ua)*

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО РЕЖИМА КАЧАНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА СЛЯБОВОЙ МНЛЗ

Приведены результаты математического моделирования, направленные на изучение несинусоидальных режимов качания кристаллизатора слябовой МНЛЗ, изучены основные достоинства и недостатки существующих несинусоидальных режимов качания. На основании данного анализа произведено усовершенствование несинусоидального режима качания, которое позволяет уменьшить ударные нагрузки на 5-25%, что позволит повысить срок службы привода механизма качания и снизить вероятность образования волновых колебаний металла в кристаллизаторе.

Ключевые слова: механизм качания, коэффициент несинусоидальности, время опережения, волновые колебания.

Широкое использование гидравлических механизмов качания стало возможным благодаря бурному развитию систем автоматического управления в 80-90-х годах XX века и ввода их в производственную среду. Это позволило конструкторам не только применить наряду с синусоидальными режимами качания и асимметричные (несинусоидальные), которые позволяют достигнуть совершенно новых возможностей по управлению соотношением параметров качаний кристаллизатора в зависимости от скорости разливки [1, 2], но и осуществлять более плавное регулирование параметров качания при изменениях в процессе литья, а также использовать более широкий диапазон технологических параметров, связанных с качанием кристаллизатора [3, 4].

Кроме того, по данным различных литературных источников, отмечается, что качание по несинусоидальным режимам по крайней мере на 30% уменьшает глубину следов качания по сравнению с синусоидальным режимом [5]. Установлено, что для несинусоидального режима качания в сравнении с синусоидальным, характерен меньший период сжатия (время опережения), при котором образуются неглубокие следы качания шириной около 250 микрон для одинаковых марок стали. В целом следует отметить, что несинусои-

дальный режим качания является эффективным способом сокращения образования глубоких твердых заворотов корочки.

Несинусоидальный режим качания кристаллизатора обладает следующими преимуществами в сравнении с синусоидальным режимом [6]:

- обеспечение минимизации времени опережения, а, следовательно, и снижением времени воздействия сжимающих нагрузок на корочку заготовки;
- уменьшением глубины следов качания на поверхности заготовки;
- увеличение сортамента разливаемых марок стали, за счет увеличения числа реализуемых режимов качания кристаллизатора.

Режим качания кристаллизатора оказывает влияние на качество поверхности и подповерхностных зон непрерывнолитой заготовки (глубина следов качания), а также на стабильность работы МНЛЗ (возможность образования волновых колебаний поверхности металла в кристаллизаторе). Вероятность образования волн в кристаллизаторе при использовании несинусоидальных режимов качания кристаллизатора значительно выше, чем у синусоидальных режимов. Одной из причиной этого явления является способ реализации асимметричного закона, а именно: классический асимметричный режим движения

предполагает, что движение кристаллизатора вверх осуществляется по одному синусоидальному закону (частота качания для такого закона как правило меньше цикловой частоты качания), а движение вниз – по другому (частота качания для закона движения вниз как правило больше цикловой частоты качания). При изменении направления движения происходит значительное и резкое изменение ускорения – удар. Это ведет к появлению второй гармоники в спектральной форме сигнала движения кристаллизатора, что свидетельствует о воздействии на непрерывнолитую заготовку, находящуюся в кристаллизаторе дополнительной силы, которая может вызвать образование волновых колебаний в кристаллизаторе. Причем с ростом коэффициента несинусоидальности растет и значение ускорения на удвоенной частоте качания кристаллизатора, а, следовательно, и величина возмущающего воздействия.

В связи с этим, представляется целесообразным усовершенствовать несинусоидальный режим качания с целью частичного или полного исключения второй гармоники из спектра перемещения кристаллизатора. То есть необходимо исключить резкий скачок в сигнале ускорения при смене направления движения кристаллизатора.

При решении данной задачи была разработана математическая модель в среде MathCad для проектирования и определения усовершенствованного асимметричного закона движения кристаллизатора. Данные расчеты проводились для конкретных условий разливки, а именно для кристаллизатора слябовой МНЛЗ Кислородно-конвертерного цеха ПАО «МК «Азовсталь». В качестве исходных данных используются следующие значения:

- скорость разливки $V_p=1,0$ м/мин;
- индекс опережения $I=1,4$;
- амплитуда качания кристаллизатора $A=2,5$ мм;
- коэффициент несинусоидальности $k=0,7$.

Максимальная скорость движения кристаллизатора

$$V_k = V_p * I = 1,0 * 1,4 = 1,4 \text{ м/мин.} \quad (1)$$

Тогда, частота качания кристаллизатора для амплитуд

$$f = \frac{V_k * 1000}{60 * 2 * \pi * A} = 1,485 \text{ Гц.} \quad (2)$$

Период одного колебания

$$T = \frac{1}{f} = 0,673 \text{ с.} \quad (3)$$

На основании полученных данных построим графики перемещения, скорости и ускорения движения кристаллизатора для синусоидального закона качания (коэффициент несинусоидальности 0,5). Эти графики представлены на рисунке 1.

На рисунке 1: $As*100$ – график перемещения кристаллизатора, мм*100; $Vs*10$ – график скорости движения кристаллизатора, мм/с*10; as – график ускорения кристаллизатора, мм/(с²); $Vt*10$ – график скорости разливки, мм/с*10.

Определим время опережения (NST) и относительное время опережения (NSP) для представленных выше синусоидальных режимов качания кристаллизатора:

$$NST = \frac{1}{\pi * f} * \arccos\left(\frac{V_p * 1000}{2 * A * \pi * f * 60}\right); \quad (4)$$

$$NSP = \frac{100}{\pi} * \arccos\left(\frac{V_p * 1000}{2 * A * \pi * f * 60}\right); \quad (5)$$

и $NST=0,166$ с; $NSP=24,7$ %.

Далее определим время движения вверх и время движения вниз кристаллизатора для несинусоидального режима качания с коэффициентом несинусоидальности $k=0,7$:

$$t_b = T * k; \quad (7)$$

$$t_n = T - t_b; \quad (8)$$

и $t_b = 0,47$ с; $t_n = 0,2$ с.

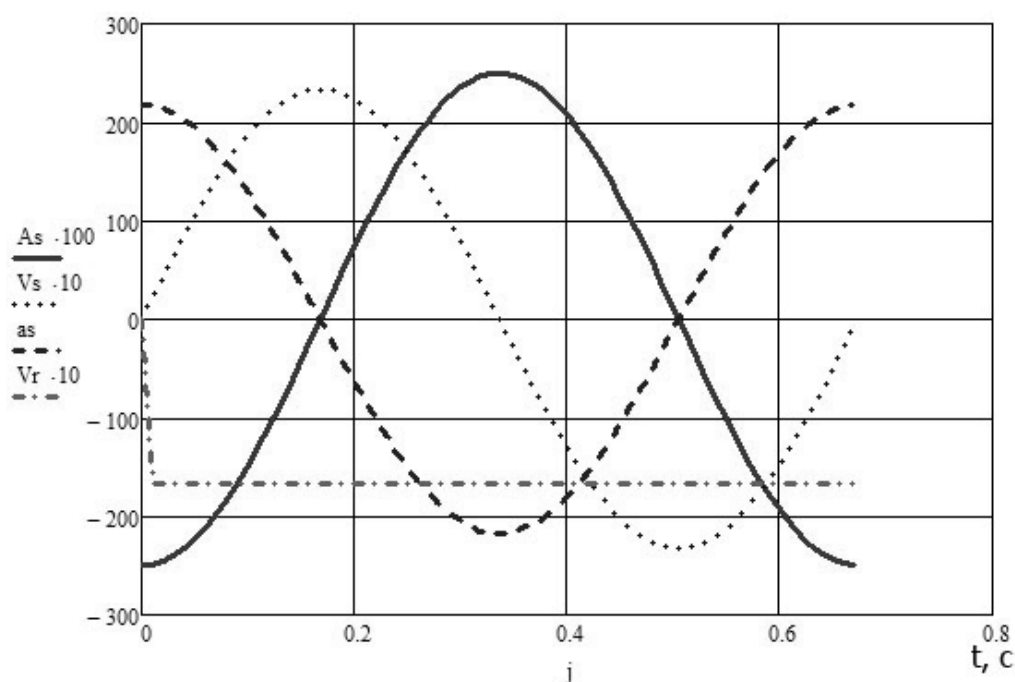


Рисунок 1 – Графики перемещения, скорости и ускорения кристаллизатора, соответствующие синусоидальному режиму качания

Частоты качания кристаллизатора при его движении вверх и вниз:

$$f_b = \frac{1}{2 \cdot t_b}; \quad (9)$$

$$f_n = \frac{1}{2 \cdot t_n}; \quad (10)$$

и $f_b = 1,06$ Гц; $f_n = 2,48$ Гц.

На основании рассчитанных данных построим графики перемещения, скорости и ускорения кристаллизатора при использовании несинусоидального режима качания кристаллизатора с коэффициентом несинусоидальности $k=0,7$. Эти графики представлены на рисунке 2.

На рисунке 2: $A_{ns} \cdot 100$ – график перемещения кристаллизатора, мм $\cdot 100$; $V_{ns} \cdot 10$ – график скорости движения кристаллизатора, мм/с $\cdot 10$; a_{ns} – график ускорения кристаллизатора, мм/(с 2); $V_r \cdot 10$ – график скорости разливки, мм/с $\cdot 10$.

На рисунке 2 при смене направления движения кристаллизатора присутствует

резкий скачок в ускорении, который вызывает значительное увеличение модуля значения ускорения и приводит к появлению удара.

Определим время опережения NST и относительное время опережения NSP для представленных выше несинусоидальных режимов качания кристаллизатора (выражения 4, 5): NST=0,145 с; NSP=35,9 %.

На рисунке 2: $A_{ns} \cdot 100$ – график перемещения кристаллизатора, мм $\cdot 100$; $V_{ns} \cdot 10$ – график скорости движения кристаллизатора, мм/с $\cdot 10$; a_{ns} – график ускорения кристаллизатора, мм/(с 2); $V_r \cdot 10$ – график скорости разливки, мм/с $\cdot 10$.

На рисунке 2 при смене направления движения кристаллизатора присутствует резкий скачок в ускорении, который вызывает значительное увеличение модуля значения ускорения и приводит к появлению удара.

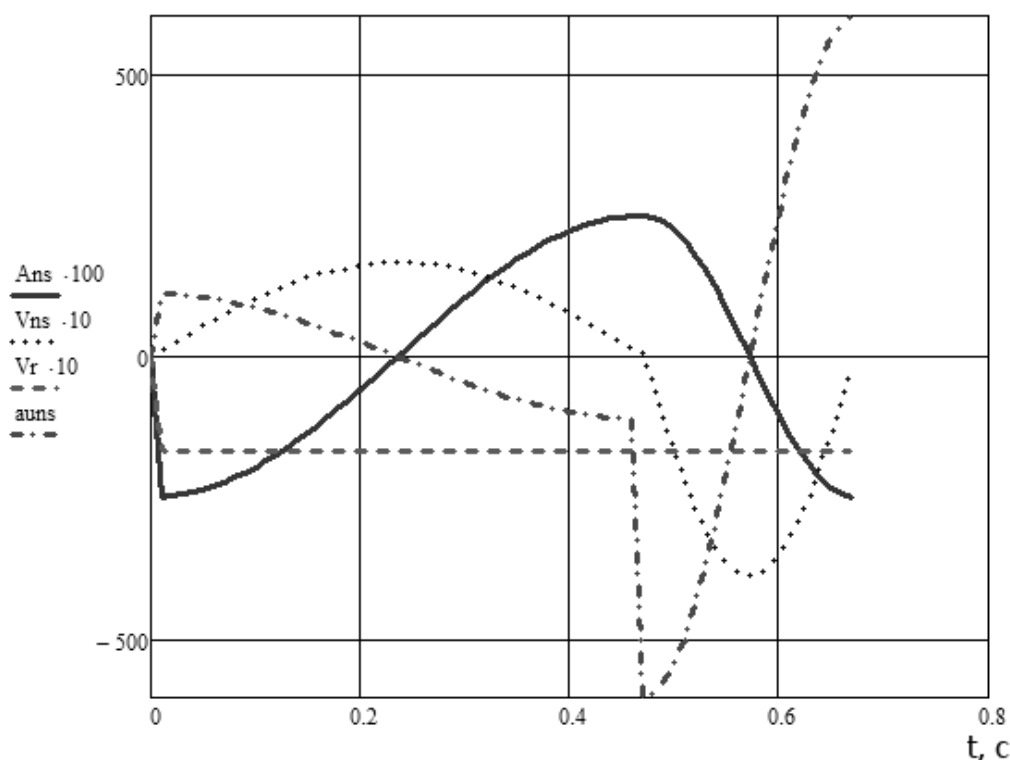


Рисунок 2 – Графики перемещения, скорости и ускорения кристаллизатора, соответствующие несинусоидальному режиму качания ($k=0,7$)

Определим время опережения NST и относительное время опережения NSP для представленных выше несинусоидальных режимов качания кристаллизатора (выражения 4, 5): NST=0,145 с; NSP=35,9 %.

Для устранения резкого изменения значения ускорения в законе движения кристаллизатора необходимо исключить скачок, обеспечив при этом неизменность времени опережения. Для этого следует осуществлять плавное изменение ускорения на участке изменения направления движения кристаллизатора. Первое, что требуется сделать - определить точку начала опережения ($t_{оп}$) и точку изменения направления движения кристаллизатора на временной шкале (t_b). Далее определим участок сглаживания относительно точки ($t_{оп}$)

$$\Delta t = 2 * (t_{оп} - t_b). \quad (11)$$

В качестве метода устранения скачка при изменении направления движения

кристаллизатора используем сглаживание прямой линией. Для этого определим значение ускорения в конечных точках прямой: $a(t_b - \Delta t)$ и $a(t_b + \Delta t)$. Имея координаты 2-х точек подберем уравнение прямой:

$$y = k * x + b; \quad (12)$$

$$k = \frac{a(t_b + \Delta t) - a(t_b - \Delta t)}{-2 * \Delta t}; \quad (13)$$

$$b = a(t_b - \Delta t) - k * (t_b - \Delta t). \quad (14)$$

После того, как определили уравнение прямой, произведем сглаживание сигнала ускорения. Далее, проинтегрировав сигнал ускорения кристаллизатора, получим сигнал скорости движения кристаллизатора с учетом сглаживания; а, дважды проинтегрировав - получим сигнал перемещения кристаллизатора. Построим графики перемещения, скорости и ускорения кристаллизатора при использовании несинусоидального режима качания кристаллизатора со сглаживанием по ускорению. Коэффици-

циентом несинусоидальности $k=0,6$. Эти графики представлены на рисунке 3.

На рисунке 3: $Hnsmod \cdot 100$ – график перемещения кристаллизатора, мм*100; $Vnsmod \cdot 10$ – график скорости движения кристаллизатора, мм/с*10; $Ansmod$ – график ускорения кристаллизатора, мм/(с²); $Vr \cdot 10$ – график скорости разливки, мм/с*10.

Применение сглаживания позволяет не только исключить резкий скачок ускорения, но и снизить максимальное значение ускорения в зависимости от параметров качания (амплитуда, частота, коэффициент несинусоидальности) на 5-25% (рис. 3).

Для сравнения изменений, внесенных в режимы качания кристаллизатора с применением сглаживания, построены соот-

ветствующие графики перемещения, скорости и ускорения на одной координатной сетки. Они представлены соответственно на рисунке 4-6.

Ускорение движения кристаллизатора для закона движения с использованием сглаживания определяется по следующей зависимости:

$$a = \begin{cases} -A \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot f_b^2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_b \cdot t - \frac{\pi}{2}); & t \in [0; t_b - \Delta t]; \\ k \cdot t + b; & t \in (t_b - \Delta t; t_b + \Delta t); \\ -A \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot f_n^2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot t + \frac{\pi}{2}); & t \in [t_b + \Delta t; T]. \end{cases} \quad (15)$$

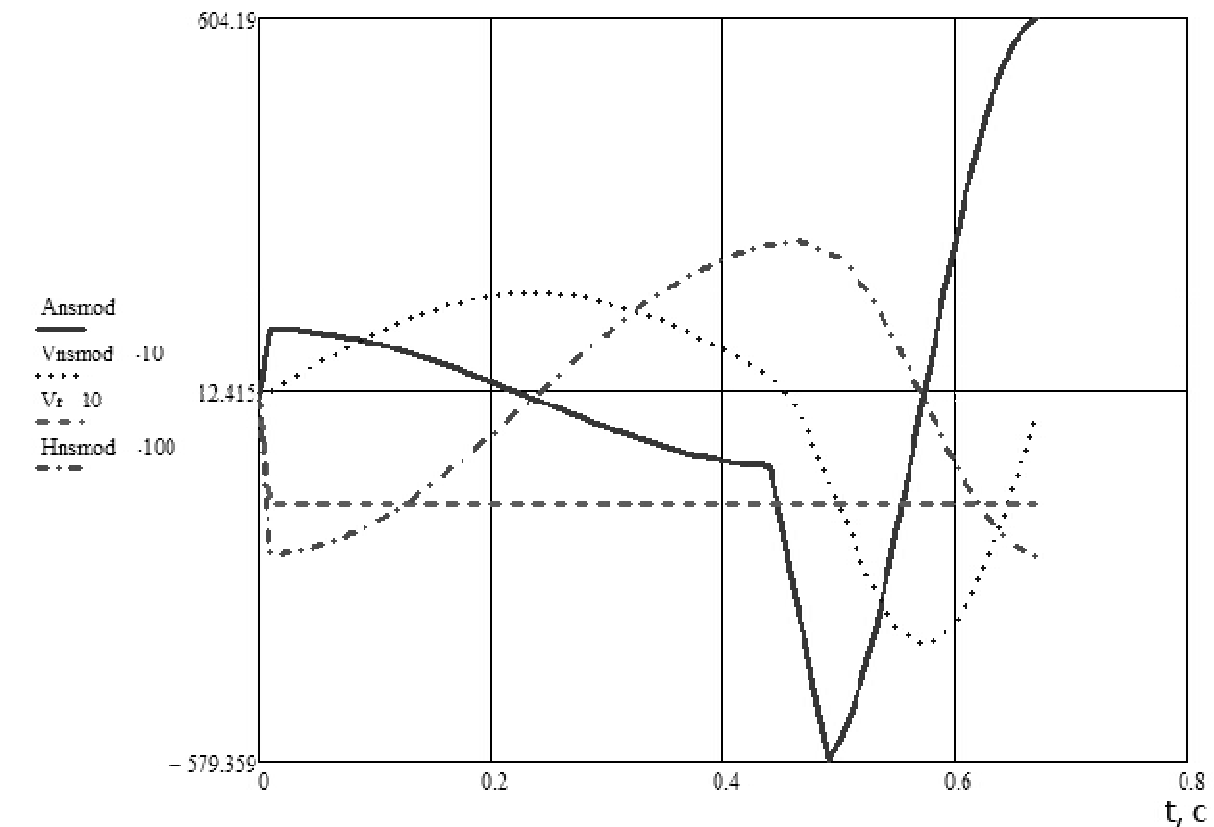


Рисунок 3 – Графики перемещения, скорости и ускорения кристаллизатора несинусоидального режима качания при использовании сглаживания ($k=0,7$)

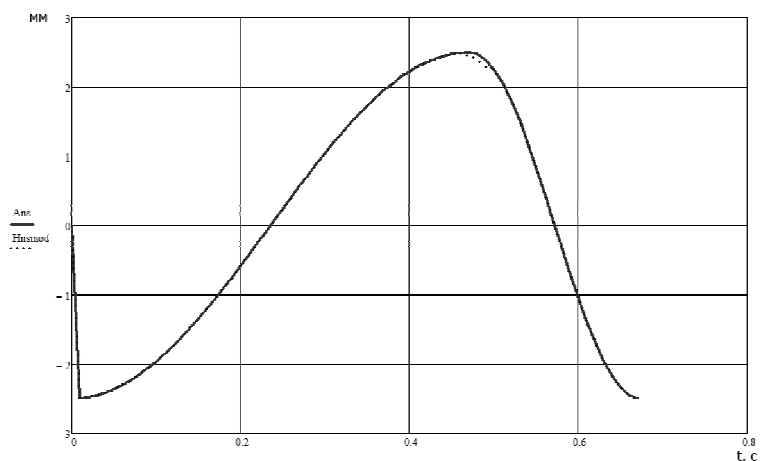


Рисунок 4 – Графики перемещения кристаллизатора несинусоидального режима качания без сглаживания (сплошной) и со сглаживанием (пунктирный) ($k=0,7$; $A=2,5$ мм)

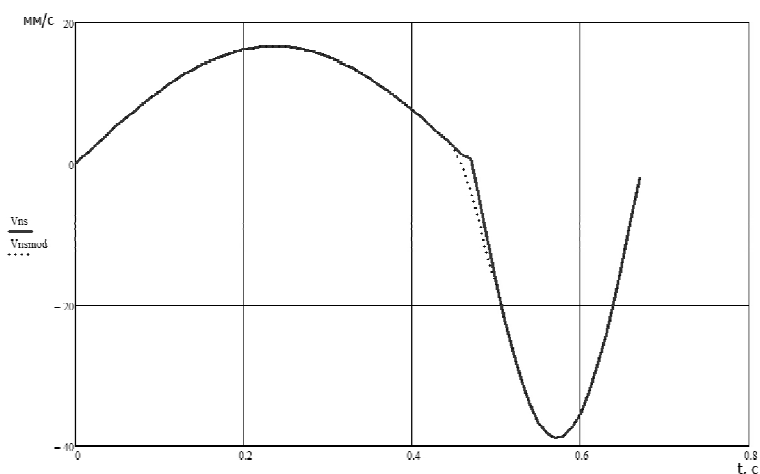


Рисунок 5 – Графики скорости движения кристаллизатора несинусоидального режима качания без сглаживания (сплошной) и со сглаживанием (пунктирный) ($k=0,7$; $A=2,5$ мм)

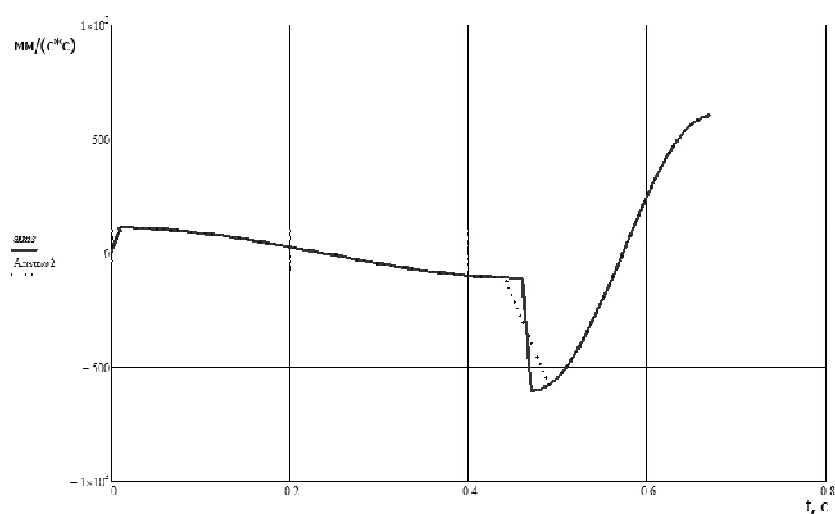


Рисунок 6 – Графики ускорения кристаллизатора несинусоидального режима качания без сглаживания (сплошной) и со сглаживанием (пунктирный) ($k=0,7$; $A=2,5$ мм)

При сравнении двух типов несинусоидальных режимов качания существенных отличий в графиках перемещения и скорости не обнаружено. Поэтому модифицированный несинусоидальный режим более предпочтительный, чем соответствующий ему традиционный несинусоидальный режим, так как:

1. При неизменном времени опережения NST и относительном времени опережения NSP, устранен скачок в сигнале ускорения при изменении направления движения кристаллизатора, следовательно, отсутствует удар.

2. Снижены максимальные значение ускорения в зависимости от параметров качания (амплитуда, частота, коэффициент несинусоидальности) на 5-25%, а, следовательно, и инерционные нагрузки на механизм качания, что способствует продлению срока службы привода механизма качания.

3. Снижена амплитуда второй гармоники в спектре перемещения, а, следовательно, уменьшена вероятность возникновения волн на поверхности жидкой стали в кристаллизаторе.

Библиографический список

1. Fuchs W. *Effects of oscillation waveform on the surface quality of SBQ-billets: experiences with hydraulic oscillators at Von Moos Stahl AG* / W. Fuchs, S. Lemgen, H. Roelofs, C. Terrelli // *4th European Continuous Casting Conference, October 14-16, 2002*. – 2002. – P. 405-414.
2. Szekeres E. S. *Overview of mold oscillation in continuous casting* / E. S. Szekeres // *Iron and Steel Engineer*. - July 1996. – P. 29-37.
3. Смирнов А. Н. *Некоторые подходы к выбору рациональных параметров качания кристаллизаторов МНЛЗ* / А. Н. Смирнов, О. В. Антыкуз, А. Ю. Цупрун, В. М. Пильгаев // *Электрометаллургия*. – 2008. – №5. – С. 22-30.
4. Данилов В.Л. *Взаимодействие слитка с кристаллизатором при непрерывном литье тонких слябов* / В.Л. Данилов, С.В. Зарубин, Б.А. Сивак [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 1997. – №6. – С. 11-13.
5. Darle T. *Hydraulic Oscillation of the CC Slab Mold at Sollac Florange: First Industrial Results, Future Developments* / T. Darle, [et al] // *Steelmaking Conference Proceedings*. - 1993. – Warrendale: 1993. – P.209-218.
6. Itoyama S. *Effect of casting conditions on oscillation mark depth* / S. Itoyama // *CAMP-ISIJ*. – vol. 5. – 1992. – P. 1225-1228.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А.М.

Статья поступила в редакцию 01.07.13.

к.т.н. Антикуз О.В. (ДонДТУ, м. Донецьк, Україна)

ВДОСКОНАЛЕННЯ НЕСИНУСОЇДАЛЬНОГО РЕЖИМУ ХИТАННЯ КРИСТАЛІЗАТОРА СЛЯБОВОЇ МБЛЗ

Наведено результати математичного моделювання, спрямовані на вивчення несинусоїдних режимів хитання кристалізатора слябової МБЛЗ, вивчено основні переваги та недоліки існуючих несинусоїдних режимів хитання. На підставі даного аналізу розроблено удосконалений несинусоїдальний режим хитання, який дозволяє зменшити ударні навантаження на 5-25%, що дозволить підвищити термін служби приводу механізму хитання і знизити ймовірність утворення хвильових коливань металу в кристалізаторі.

Ключові слова: механізм хитання, коефіцієнт несинусоїдальності, час випередження, хвильові коливання.

Antykuz O.V. (DonSTU, Donetsk, Ukraine)

IMPROVEMENT OF NON-SINUSOIDAL MODE OSCILLATION OF THE MOLD SLAB CASTER

The results of mathematical modeling, aimed at studying the non-sinusoidal mold oscillation modes slab caster, studied the main advantages and disadvantages of the existing non-sinusoidal oscillation modes. Based on this analysis, the improvement made non-sinusoidal oscillation mode, which reduces the impact load by 5-25%, which will increase the life of the drive mechanism of the swing, and reduce the probability of wave oscillations of the metal in the mold.

Key words: mechanism of mold oscillation, coefficient of non-sinusoidal, negative strip time, the wave oscillation.