

## Некоторые подходы к выбору рациональных параметров качания кристаллизаторов МНЛЗ

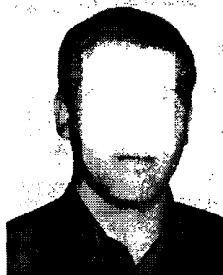
А. Н. Смирнов, О. В. Антыкуз, А. Ю. Цупрун, В. М. Пильгаев

Донецкий национальный технический университет,  
НПО "Доникс", АО НКМЗ

В последние два десятилетия в мировой практике непрерывной разливки стали развиваются тенденции увеличения удельной производительности МНЛЗ путем повышения скорости разливки при росте требований к качеству поверхности заготовки [1–3]. При этом большое внимание уделяется уменьшению глубины следов качания на поверхности заготовки, а также проблематике предупреждения "прилипания" твердой корочки к поверхности кристаллизатора, что не только препятствует нормальному (послойному) наращиванию твердой корочки (рис. 1, *a–d*), но также обуславливает значительное увеличение усилия вытяжки заготовки и приводит к локальному разрушению твердой корочки (в виде трещин) под кристаллизатором (рис. 1, *e*).

Известно, что сообщение кристаллизатору возвратно-поступательных движений с определенными частотой и амплитудой направлено, прежде всего, именно на предупреждение "прилипания" твердой корочки к поверхности кристаллизатора [4, 5]. Однако при отсутствии строгих теоретических обоснований в практике непрерывной разливки стали не существует единого мнения относительно выбора рациональных параметров качания [6, 7]. Не менее важным моментом, требующим определенных уточнений, является вопрос о том, как изменять параметры качания в случае изменения скорости вытяжки заготовки (например, в начале разливки).

Идея придания кристаллизатору колебательных движений принадлежит З. Юнгхансу, которая запатентована еще в 30-х годах XX века. Предложенный им режим



качания кристаллизатора состоял в следующем: кристаллизатор двигался вниз со скоростью, равной скорости разливки, что приблизительно составляло три четверти каждого цикла, а затем следовал быстрый возврат в исходное положение. Соответственно, во время движения кристаллизатора вниз между корочкой слитка и стенкой кристаллизатора не было относительного движения. Соотношение продолжительности движения кристаллизатора вниз и вверх за один цикл составляло 3 : 1, а частота качания определялась по следующей зависимости:

$$f = \frac{3v_p}{4s},$$

где  $f$  — частота качания кристаллизатора, цикл/мин;  $s$  — размах хода кристаллизатора, м;  $v_p$  — скорость разливки, м/мин.

Уже в 1949 г. И. Росси использовал принцип качания кристаллизатора З. Юнгханса на экспериментальной машине непрерывного литья стальных заготовок (МНЛЗ) на заводе Allegheny Ludlum в Ватервиле (США) [4]. Примерно в это же время качание кристаллизатора по З. Юнгхансу применили на экспериментальной МНЛЗ завода Mannesmann-Huttenwerke AG (Германия) [5].

В середине 50-х годов И. Халлидей развил идею качания кристаллизатора, предложенную З. Юнгхансом, введя цикл так называемого "отрицательного раздевания" слитка (negative strip time) или опережения (т. е. времени, в течение которого кристаллизатор двигался вниз со скоростью, большей, чем скорость движения заготовки [6]. Соотношение продолжи-

тельности движения кристаллизатора вниз и времени его движения вверх сохранилось таким же: 3 : 1. Процесс опережения происходил во время каждого цикла качания при движении вниз. В дальнейшем идея качания кристаллизатора с наличием цикла опережения получила широкое распространение. Достаточно сказать, что все режимы качания кристаллизаторов, применяемые на современных МНЛЗ, обязательно обеспечивают эффект опережения кристаллизатором заготовки.

В дальнейшем наиболее существенным изменением параметров качания кристаллизатора явился переход к синусоидальному режиму. Считается, что впервые синусоидальный закон колебаний применили на двух советских машинах для отливок слябовых заготовок: в 1959 г. на Новолипецком металлургическом комбинате и в 1960 г. на Донецком металлургическом заводе [8, 9]. До начала 90-х годов прошлого века синусоидальный режим качания кристаллизатора оставался наиболее распространенным вследствие его технических преимуществ, а именно: простота реализации (рис. 2), меньшие моменты инерции и рывки ускорения по сравнению с режимом, предложенным З. Юнгхансом.

Широкое распространение синусоидального режима качания с использованием электромеханического привода связано с простотой в изготовлении и низкой стоимостью эксцентриков (по сравнению со сложно-профильными кулачками для обеспечения несинусоидальных режимов качания с использованием электромеханического привода) и несложной системой управления электродвигателем. При этом наиболее важными параметрами, характеризующими работу кристаллизатора, являются частота качания, перемещение, которое совершает кристаллизатор, двигаясь в одном направлении, и временной отрезок, при котором происходит опережение заготовки кристаллизатором.

Между тем качание кристаллизатора не только препятствует прилипанию твердой корочки, но также является причиной возникновения на поверхности заготовки так называемых "следов качания" — углублений по периметру заготовки в виде поперечных канавок (рис. 3). Принято считать, что следы качания появляются только тогда, когда на вектор линейной скорости вытягивания заготовки накладывается другой вектор, соответствующий закономерно изменяющемуся по направлению движения кристаллизатора [10, 11].

Наиболее вероятный, на наш взгляд, механизм образования следов качания представлен на рис. 4. В соответствии с этим механизмом глубина и форма канавки следов качания определяется фазой

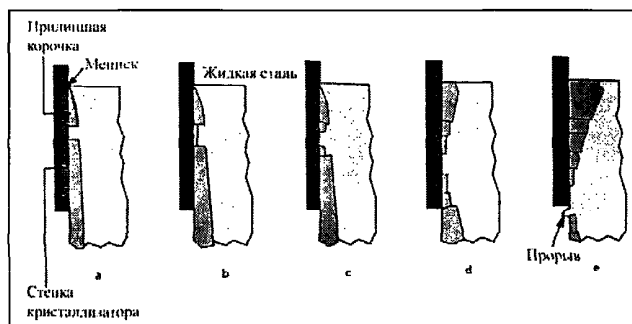


Рис. 1. Схематическое представление процесса наращивания твердой корочки при нормальных условиях (а) и при ее "прилипании" к стенке кристаллизатора

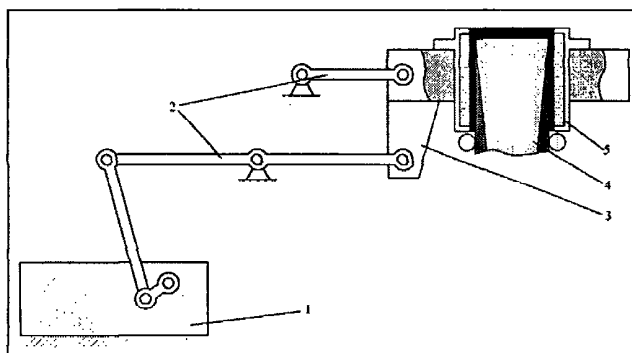


Рис. 2. Электромеханический привод механизма качания кристаллизатора (синусоидальные движения): 1 — привод механизма качания; 2 — система рычагов; 3 — стол качания кристаллизатора; 4 — непрерывнолитая заготовка; 5 — водоохлаждаемый кристаллизатор

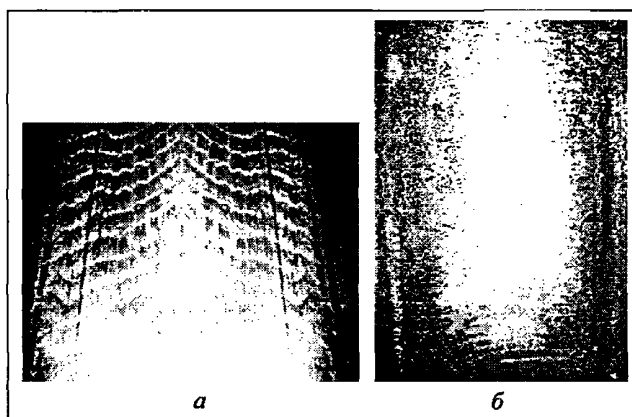


Рис. 3. Фотографии следов качания при подвешивании заготовки (а) и нормальной работе механизма качания (б)

стыковки верхнего пояса корочки (применисковая область) с основной ее частью (этапы С, D, E). При этом особое значение имеет степень совпадения положения нижнего края верхнего пояса корочки с положением верхнего края основной части

корочки в начале движения кристаллизатора вверх. Так, если нижний край верхней части корочки опустится значительно ниже верхнего края основной корочки, то в процессе их контакта может произойти загибание краев корочки внутрь

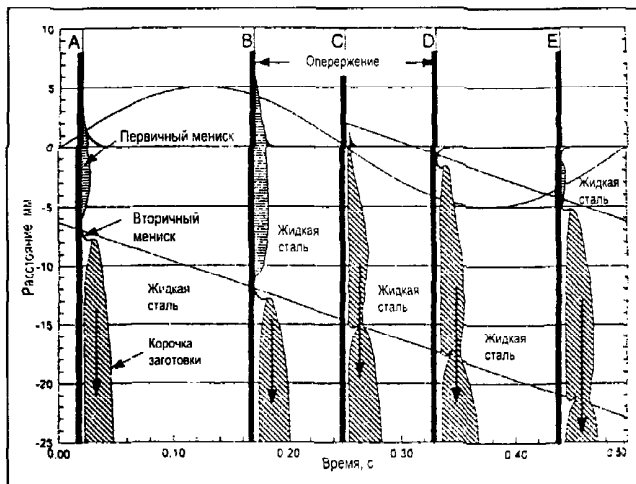


Рис. 4. Механизм формирования следов качания

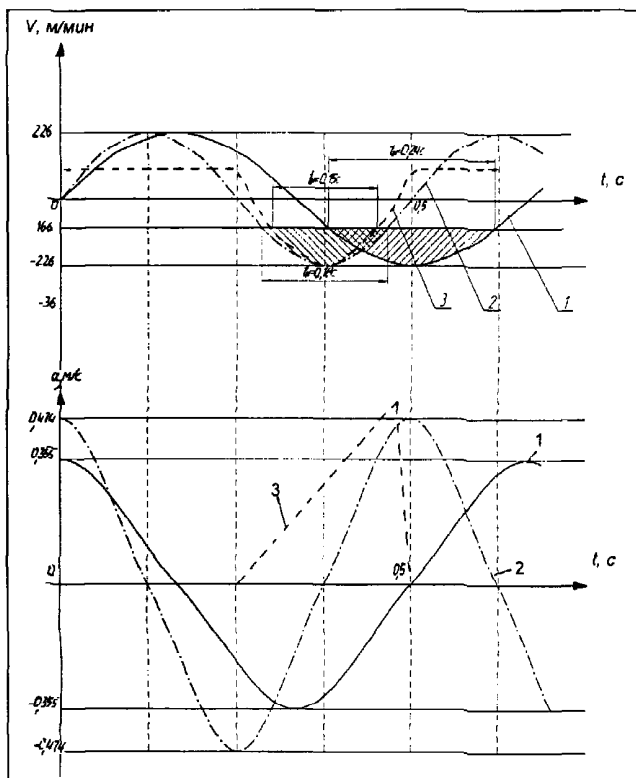


Рис. 5. Изменение скорости и ускорения для различных законов осцилляции кристаллизатора: 1 — синусоидальный закон (частота 1,5 Гц, амплитуда 4 мм); 2 — синусоидальный закон (частота 2 Гц, амплитуда 3 мм); 3 — несинусоидальный закон с частотой цикла 2 Гц

слитка, что увеличит размеры канавки следа качания. Если же нижний край верхней части корочки не "догонит" верхний край основной корочки, то форма канавки следа качания будет соответствовать форме мениска жидкой стали между ними (этап В).

Известно, что при прочих равных условиях отклонения в толщине корочки минимальны тогда, когда шаг между следами качания не превышает 12,5 мм [6].

Глубину проникновения ( $d$ , мм) следов качания в тело заготовки можно определить по эмпирической формуле [12]:

$$d = 0,065 \cdot 1,145^S \cdot (200 \cdot 0,9^S)^{t_N},$$

где  $S$  — размах хода кристаллизатора, м;  $t_N$  — время опережения, с.

Время опережения  $t_N$  характеризуется тем, что в течение определенного отрезка твердая корочка формирующегося слитка испытывает сжимающие напряжения вследствие того, что кристаллизатор движется быстрее, чем заготовка. Соответственно, возникающие в это время дефекты поверхности (растрескивания) могут "самозалечиваться". Для синусоидального закона качания кристаллизатора этот параметр определяют следующим выражением [7, 10, 13]:

$$t_N = \frac{60}{\pi \cdot f} \arccos\left(\frac{v_p}{\pi S f}\right). \quad (3)$$

Из приведенного уравнения следует, что при синусоидальном режиме для двух значений скорости разливки  $v_p$  при одинаковой величине размаха хода кристаллизатора  $S$  невозможно настраивать постоянными как время, так и путь опережения. Отсюда становится очевидной проблема сохранения рациональных соотношений времени и пути опережения при наблюдающихся на практике различных скоростях разливки. Эта проблема усиливается при увеличении скорости разливки, так как  $t_N$  будет меняться в значительных пределах даже при небольших изменениях скорости разливки (рис. 5).

Для дополнительной количественной оценки выбора необходимого времени опережения используют также величину относительного значения времени опережения  $NSP$ , выраженную в процентах. Для синусоидального закона качания кристаллизатора этот параметр определяют следующим выражением [13]:

$$NSP = \frac{1}{\pi} \arccos\left(\frac{v_p}{\pi S f}\right).$$

Кроме того, в литературе выделяют еще один критерий выбора параметров осцилляции — ин-

дске опережения ( $NSR$ ), устанавливающий отношение между средней скоростью движения кристаллизатора  $v_{cp} = 2Sf$  и скоростью разливки  $v_p$  (по материалам буклета). При оптимизации параметров качания кристаллизатора с использованием индекса опережения обычно рекомендуется принимать его значение на уровне 1,25–1,60 [14].

Относительно времени опережения  $t_N$  рекомендации носят менее однозначный характер. Например, в работах [7, 13] величину  $t_N$  следует обеспечивать на уровне 0,25 с. Значение  $NSP$  рекомендуется поддерживать в пределах 35–45 %. В то же время в более поздних работах, относящихся к эксплуатации высокоскоростных сортовых МНЛЗ, рекомендуется принимать время опережения на уровне 0,12–0,14 с [15]. При этом оптимизация величины  $t_N$  осуществляется не только из соображений минимизации вероятности прорывов жидкого металла и обрывов заготовки, но и из условия уменьшения глубины проникновения следов качания. Для стали, склонной, например, прилипанию к стенке кристаллизатора (в частности, при высокой скорости разливки), требуется обеспечивать минимально низкую относительную скорость проскальзывания заготовки и стабильную толщину жидкой прослойки шлака по периметру контакта заготовка–кристаллизатор при высокой вязкости. Это также обеспечивает соответствующее термосопротивление с учетом толщины смазывающей пленки.

Надежная подача сталеразливочной смеси в зону контакта корки заготовки и стенки кристаллизатора оказывается возможной лишь в той области, где разность между скоростями движения кристаллизатора и заготовки положительна. Следовательно, величину времени опережения ( $t_N$ ) следует поддерживать по возможности на меньшем уровне. Снижение времени опережения путем замены одного синусоидального закона другим ведет к изменению цикла качания, увеличению динамических нагрузок (ускорения, что показано на рис. 5, кривая 1 и 2). Использование же несинусоидальных законов осцилляции позволяет изменять время опережения в более широком диапазоне, не изменяя при этом общего времени цикла качания, а также значительно меньше увеличивая динамические нагрузки (рис. 5, кривая 3).

Совершенно новые возможности по управлению соотношением параметров качания кристаллизатора в зависимости от скорости разливки могут быть достигнуты при применении несинусоидальных режимов, модулируемых гидроприводом [15, 16]. Широкое использование таких механиз-

мов качания стало возможным в связи с бурным развитием систем автоматического управления в 80–90-х годах XX века и вводом их в производственную среду. Это позволило конструкторам не только применить совместно с синусоидальными режимами и триангулярные, но и осуществлять более плавное регулирование параметров осцилляции при изменениях в процессе литья, а также использовать более широкий диапазон технологических параметров, связанных с качанием кристаллизатора. Схема системы качания кристаллизатора с серво-гидравлическим приводом на заводе Sollac Florange (Франция) представлена на рис. 6.

При отливке слябовой заготовки сечением  $190 \times 1100$  мм со скоростью 1,4 м/мин (низкоуглеродистая сталь,  $\approx 0,025$  % С) выполнено испытание одиннадцати различных триангулярных сигналов. Частоту колебаний кристаллизатора изменяли от 100 до 200 циклов в минуту, показатель искажения составлял 55–80 %. Данные, полученные в ходе испытания, показали, что триангулярная осцилляция по крайней мере на 30 % уменьшает глубину следов качания по сравнению с синусоидальным режимом [14]. Установлено, что для триангулярного режима колебаний, по сравнению с синусоидальным, характерен меньший период сжатия, при котором на поверхности заготовок образуются неглубокие вибрационные метки шириной около 250 мкм. В целом промышленные испытания на заводе Sollac Florange (Франция), проведенные на стали со сверхнизким содержанием углерода, показали, что триангулярный закон колебаний является эффективным способом сократить образование глубоких твердых заворотов корочки.

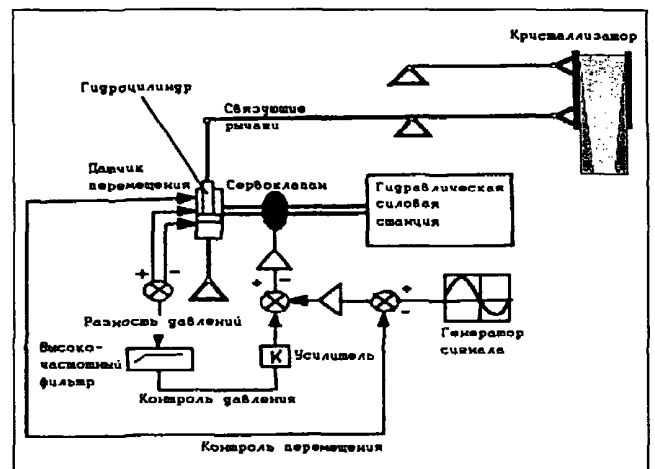


Рис. 6. Схема системы качания кристаллизатора с серво-гидравлическим приводом

Ведущие производители МНЛЗ в мире (SMS-Demag, Siemens-VAI, Danielli, НКМЗ и др.) стремятся использовать в новых машинах гидравлические приводы качания кристаллизатора, закладывая в них как синусоидальные, так и триангулярные режимы осцилляции.

Как правило, механизм качания кристаллизатора с гидроприводом состоит из двух отдельных блоков. Каждый блок состоит из стационарной и качающейся сварных рам. Подвижные массы (качающиеся рамы и кристаллизатор) уравниваются с помощью пружин. Траектория движения качающейся рамы обеспечивается двумя парами рессор, узлы которых объединены в один блок с

**Технические характеристики некоторых параметров механизмов качания кристаллизаторов слывовых МНЛЗ производства Siemens-VAI (А) и НКМЗ (Б)**

| Наименование                         | А<br>(НЛМК)                          | Б<br>(НЛМК)                          | Б ("Азов-сталь")                         |
|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|
| Сечение отливаемых слывов, мм:       |                                      |                                      |                                          |
| толщина                              | 220; 250                             | 200; 250;<br>315                     | 220; 250;<br>300                         |
| ширина                               | 900—1850                             | 900—1850                             | 1250—1850                                |
| Тип кристаллизатора                  | Вертикальный                         | Вертикальный                         | Радиальный                               |
| Механизм качания                     | Гидравлический рессорного типа       | Гидравлический рессорного типа       | Гидравлический рессорного типа           |
| Амплитуда качания, мм                | До ±6                                | До ±7                                | До ±6                                    |
| Частота качания, мин <sup>-1</sup>   | До 400                               | До 240                               | До 300                                   |
| Закон движения                       | Синусоидальный с асимметрией 0,5—0,7 | Синусоидальный с асимметрией 0,5—0,7 | Синусоидальный с возможностью асимметрии |
| Масса подвижных частей механизма, кг | ≈5000                                | ≈7400                                | ≈9500                                    |
| Уравновешивание                      | Пружинное                            | Пружинное                            | Пружинное + пневматическое               |
| Гидроцилиндр (двухштоковый), шт.:    | 2                                    | 2                                    | 2                                        |
| диаметр поршня, мм                   | 125                                  | 125                                  | 118                                      |
| диаметр штока, мм                    | 90                                   | 80                                   | 80                                       |
| ход поршня, мм                       | 25                                   | 50                                   | 50                                       |
| рабочее давление, МПа                | 20                                   | 21                                   | 23                                       |
| Сервоклапан (фирма-производитель)    | MOOG                                 | MOOG                                 | Rexroth                                  |
| Исполнение                           | 2 раздельных блока                   | 2 раздельных блока                   | 1 моноблок                               |
| Расположение гидроцилиндров          | По оси качания                       | Диагональное                         | По оси качания                           |
| Масса механизма, кг                  | 13 250                               | 13 654                               | 28 178                                   |
| Год пуска МНЛЗ                       | 2008                                 | 2008                                 | 2005                                     |

качающейся рамой. Качающиеся рамы приводятся в движение двумя гидроцилиндрами, оси которых расположены в вертикальной плоскости, проходящей примерно через центр тяжести системы подвижных масс и расположенной под некоторым углом к плоскости базовой стенки. Для подачи охлаждающей воды к кристаллизатору в рамках выполнена внутренняя трубная разводка. При этом отношение время движения кристаллизатора вниз к общему периоду качания может достигать 0,70—0,75.

В таблице приведены технические характеристики механизмов качания для трех слывовых МНЛЗ, которые разработаны компанией Siemens-VAI и Новокраматорским машиностроительным заводом. Показано, что оснащение механизмов качания кристаллизаторов является примерно одинаковым. В конструкционном плане механизмы качания кристаллизаторов НКМЗ отличаются тем, что гидроцилиндры расположены по диагонали, что обеспечивает более точное соблюдение траектории качания при нестационарных режимах разливки.

#### Заключение

В настоящее время отсутствуют системно обобщенные рекомендации по выбору параметров качания кристаллизатора, что связано со спецификой конструкционного исполнения приводов качания кристаллизаторов и выбираемых законов их перемещения. Между тем существующей практикой установлено, что более широкие возможности обеспечивает гидравлический привод качания с несинусоидальным законом движения, изменения скорости и ускорения, который позволяет оперативно оптимизировать параметры качания даже в случае заметного изменения скорости разливки непосредственно в ходе разливки. Промышленные результаты показывают, что в этом случае существенно уменьшается глубина проникновения следов качания в заготовку.

#### Список литературы

1. Смирнов А. Н. Современный прогресс и перспективы развития процессов непрерывной разливки стали // Сталь. 2005. № 12. С. 29—32.
2. The Making Shaping and Treating of Steel: Casting Volume. — Pittsburgh, PA: The AISE Steel Foundation, 2003. 860 p.
3. Birat J. P. New Casting Technologies — Trends and Perspective Inside and Outside Mini-Mills / IOM Annual Meeting, Steel Div., Birmingham (Sept. 20—21, 1999). Birmingham. 1999.
4. Rossi I. The continuous Casting Machine Comes of Age, AISE Yearly Proceedings, 1964. P. 155—160.
5. Speith K. G., Bungereoth A. Continuous Casting of Steel in Western Germany // Journal of the Iron and Steel Institute, 1958. V. 182 (10). P. 158—161.
6. Edward S. Szekeres "Overview of mold oscillation in continuous casting" // Iron and Steel Engineer, July. 1996. P. 29—37.
7. Wolf M. M. Mold Oscillation Guidelines // Steelmaking Conference Proceedings. 1991. P. 51—71.

8. **Wolf M. M.** History of Continuous Casting, Steelmaking Conference Proceedings, ISS-AIME, 1992. V. 75. P. 83—137.
9. **Процессы** непрерывной разливки / А. Н. Смирнов, В. Л. Пилюшенко, А. А. Минаев и др. Донецк: ДонНТУ, 2002. 536 с.
10. **Шюрман Э., Фиге Л., Кайзер Х.-П., Клагес Т.** Влияние качания кристаллизатора на качество поверхности непрерывнолитых слэбов / Черные металлы. 1986. № 22. С. 27—33.
11. **Royzman S.** Stresses due to oscillation marks in continuous solidifying slab: a mathematical model / Steel Technology International. 1999. P. 73—80.
12. **Michelic S., Bernhard C.** An Interactive E-Learning Resource on Steel Processing Technologies // XIII International Students' Day of Metallurgy, Montanuniversit. at Leoben. 2006. P. 117—127.
13. **Taylor C. R.** Continuous Casting Update / Metallurgical Transaction. 1975. V. 68. P. 471—473.
14. **Tarmann B.** Continuous Casting of steel. Publications of Austrian Bundeskanzleramt, booklet N 7. Vienna. 1962.
15. **Baumann H. G., Elsner E. A., Pirdzun J.** // Stahl und Eisen. 1971. V. 91. P. 139—147.
16. **Alvarez de Toledo G., Lainez E., Laradogoitia J. J.** et al. Mould Strand Interaction During Continuous Casting // Proceedings 3-rd ECCC, Madrid, October 20—23, 1998. P. 543—551.
17. **Hydraulic Oscillation of the CC Slab Mold at Sollac Florange: First Industrial Results, Future Developments / Steelmaking Conference Proceedings 1993. — Warrendale: 1993. P. 209—218.**