

**А.П. Верзилов**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: [verzilovalex@gmail.com](mailto:verzilovalex@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-0463-5006>

**А.А. Горшкова**, инженер I категории, e-mail: [mlu@ptima.kiev.ua](mailto:mlu@ptima.kiev.ua)

**Ю.А. Смирнов**, канд. экон. наук, доц., вед. инженер

**А.Р. Верзилова**, инженер I категории

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины (Киев, Украина)

## Исследование на физической модели влияния величины угла раскрытия выпускных отверстий погружных стаканов на характер истечения стали в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ)

*При проектировании конструкции погружного стакана для условий конкретного металлургического производства отдельное внимание уделяют форме и углу раскрытия боковых отверстий. Форма выпускных отверстий определяет массовый расход стали и форму струи, а угол раскрытия боковых отверстий определяет угол истечения струи металла и весь характер движения потоков металла в кристаллизаторе, количество и направленность циркуляционных потоков.*

*В результате проведенных исследований было выявлено влияние угла раскрытия выходных отверстий погружного стакана на характер движения потоков внутри кристаллизатора и установлено оптимальный угол раскрытия его боковых отверстий.*

*Для этого на физической модели были изучены процессы истечения металла в кристаллизаторе слябовых машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) при изменении угла раскрытия боковых отверстий погружного стакана в диапазоне от  $-20^\circ$  до  $20^\circ$  с шагом  $5^\circ$ . При этом было отмечено существование двух принципиально различных картин истечения металла в кристаллизаторе, которые характеризуются одной или двумя зонами циркуляции. Изменение одноциркуляционной картины на двухциркуляционную наблюдается в диапазоне от  $-10^\circ$  до  $-5^\circ$ .*

*Установлено, что рациональной величиной угла раскрытия боковых отверстий погружного стакана является значение  $10-15^\circ$ , которое может быть использовано при разливке слябов различной ширины вплоть до 1500–1600 мм. При выборе оптимального угла раскрытия погружного стакана может быть рекомендована коррекция в сторону уменьшения угла раскрытия (около  $5-8^\circ$ ), которая учитывает то, что угол истечения струи в процессе разливки больше номинального угла раскрытия, так как на него оказывают влияние верхние циркуляционные потоки.*

*Ширина кристаллизатора в значительной степени определяет выбор угла раскрытия боковых отверстий погружного стакана. Так, для слябов небольшой ширины, использование погружных стаканов с углом раскрытия от  $-20^\circ$  до  $5^\circ$  нерационально в силу взаимодействия потоков, истекающих из погружного стакана с твердой корочкой металла, которая затвердевает на стенках кристаллизатора. В то же время для слябов шириной от 1500 мм значение угла раскрытия в диапазоне от  $-5^\circ$  до  $5^\circ$  обеспечивает оптимальные условия движения потоков в кристаллизаторе, колебаний на мениске, а также кристаллизации твердой корки на узких стенках кристаллизатора.*

**Ключевые слова:** машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), кристаллизатор, погружной стакан, угол наклона боковых отверстий, зона циркуляции, сляб.

**У**гол раскрытия и форма выходных отверстий погружного стакана являются важными параметрами, которые способны существенным образом изменить характер движения циркуляционных потоков в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ [1–2]. При этом выбор оптимального значения величины

угла раскрытия и формы выпускных отверстий очень важны, так как должны решать следующие основные задачи:

– минимизация взаимодействия турбулентного потока, вытекающего из выпускного отверстия, и корочки затвердевающей стали на узкой стенке

кристаллизатора для снижения вероятности прорыва под кристаллизатором;

– оптимизация гидродинамической картины с точки зрения исключения волновых процессов на мениске, а также дополнительного удаления остаточных неметаллических включений, попадающих из промежуточного ковша;

– подогрев металла в верхних углах кристаллизатора (если это необходимо), путем направления в них вытекающей из выпускных отверстий стали.

На практике наиболее используемым углом раскрытия отверстий погружного стакана является угол  $15\text{--}20^\circ$ , который, по мнению многих исследователей, считается оптимальным [3–10]. Это объясняется тем, что потоки металла, достигающие мениска, имеют достаточно малую интенсивность. В ходе проведенных исследований была произведена попытка выявить влияние угла раскрытия выходных отверстий погружного стакана на характер движения потоков внутри кристаллизатора и установить возможность использования погружных стаканов с различными углами раскрытия при отклонении условий разлива от базовых.

В качестве базовых параметров исследования были выбраны: кристаллизатор с шириной 1500 мм, толщина сляба – 200 мм и уровень налива металла в кристаллизаторе, который соответствует глубине погружения стакана, равной 180 мм. Выбор таких параметров объясняется тем, что они являются среднестатистическими при производстве слябов на украинских металлургических предприятиях. В основу проведенных исследований были положены 9 вариантов углов раскрытия погружного стакана от  $-20^\circ$  до  $20^\circ$  с шагом  $5^\circ$ . Для большего проявления наблюдаемых явлений выполнялось подкрашивание локальных объемов жидкости цветными чернилами. Весь процесс истечения металла из погружного стакана фиксировался на цифровую видеокамеру.

Исследования были проведены с использованием методов физического моделирования. Масштаб физической модели участка промежуточный ковш – кристаллизатор МНЛЗ составил 1:2 к натурному объекту. В качестве основных критериев подобия были выбраны критерии Фруда и Вебера. В качестве рабочей жидкости, моделирующей жидкую сталь, использовалась вода при температуре  $18\text{--}25^\circ\text{C}$ . Имитация покровного шлака на поверхности металла в кристаллизаторе осуществлялась с помощью силиконового или трансформаторного масла, которые имеют высокое поверхностное натяжение [11].

Количественную оценку характера разделения струи жидкости, вытекающей из погружного стакана, на два потока осуществляли посредством планиметрического подсчета площади областей, занимаемых подкрашенной чернилами жидкости, с учетом перемешивания с окружающей жидкостью.

Характер движения струи внутри кристаллизатора при различных углах раскрытия отверстий погружных стаканов представлен на рис. 1.

В результате проведенных исследований установлено, что истечения стали из погружного стакана с углом раскрытия  $0\text{--}5^\circ$ , характеризуется тем, что по-

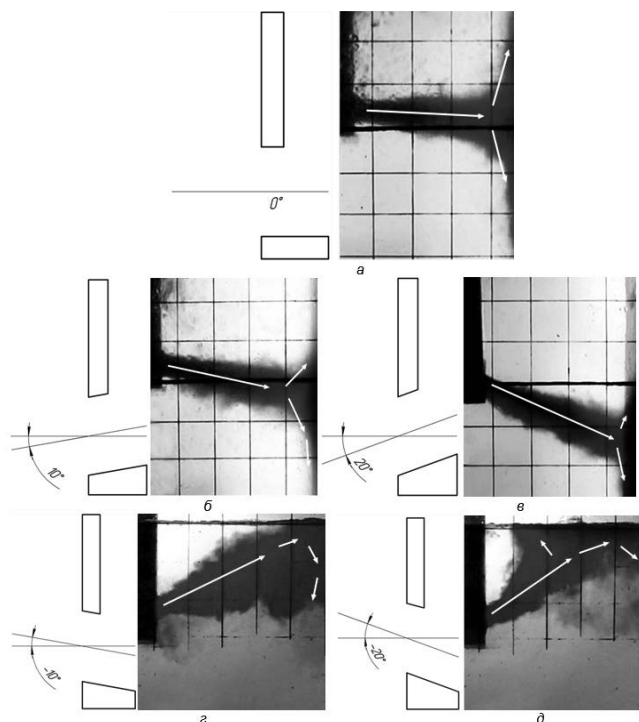


Рис. 1. Распределение свободной струи, при использовании стакана с различными углами раскрытия: а)  $0^\circ$ ; б)  $10^\circ$ ; в)  $20^\circ$ ; г)  $-10^\circ$ ; д)  $-20^\circ$

ток, движущийся из выпускных отверстий, носит достаточно компактный характер. Он движется в направлении узкой стенки кристаллизатора, и в результате взаимодействия с ней струя разбивается на два циркуляционных потока, которые примерно равны по интенсивности. Применительно к условиям эксперимента, верхний циркуляционный поток, обладая большой кинетической энергией, производит возмущение поверхности мениска, которое характеризуется большой амплитудой волн. Также важно отметить, что в зоне взаимодействия потока с узкой стенкой в реальных условиях будет наблюдаться подмыв твердой корочки затвердевающей стали. В свою очередь нижний циркуляционный поток уходит в нижние горизонты кристаллизатора, увлекая за собой неметаллические включения, находящиеся в стали. В силу приведенных выше особенностей работы, использование погружного стакана с таким углом раскрытия возможно только при разливке широких слябов, когда кинетическая энергия струи успевает рассеиваться до достижения ею узких стенок кристаллизатора.

Так, в случае использования погружного стакана с углом раскрытия  $10\text{--}15^\circ$ , контакт со стенкой происходит значительно ниже уровня мениска и практически исключает образование застойных зон в жидкой ванне кристаллизатора. Также при использовании такого погружного стакана колебаний мениска практически не наблюдается. Это объясняется тем, что благодаря наличию угла наклона выпускного отверстия достигается некоторое перераспределение циркуляционных потоков, исходя из которого, большая часть потока начинает уходить вглубь жидкой ванны, а меньшая взаимодействовать с поверхностью. Такой угол наклона выпускных отверстий можно считать рациональным практически для любой ширины сля-

бового кристаллизатора, так как при этом обеспечивается перемешивание и гомогенизация стали в жидкой ванне кристаллизатора.

Использование погружных стаканов с углом раскрытия выпускных отверстий более  $20\text{--}25^\circ$ , является практически предельным значением, которое можно рекомендовать для практического применения при разливке слябов. Это объясняется тем, что на практике угол движения потока в кристаллизаторе корректируется в большую сторону. Таким образом, жидкостный поток будет уходить глубоко в жидкую ванну, не обеспечивая при этом должного подогрева объемов металла в верхних углах кристаллизатора. Фактически при этом контакт струи со стенкой кристаллизатора происходит примерно на  $1/3\text{--}1/4$  высоты кристаллизатора, а распределение металла вверх и вниз не препятствует образованию корочки, не способствует формированию застойных зон, а также не вызывает появление волновых эффектов на поверхности металла. Однако возможности использования погружных стаканов с углом наклона  $20\text{--}25^\circ$  достаточно ограничены и их можно сформулировать следующим образом:

- малая ширина отливаемой заготовки. Это обстоятельство объясняется невозможностью обеспечения должного подогрева объемов металла в верхних углах кристаллизатора в зоне мениска верхним циркуляционным потоком, интенсивность которого крайне мала;
- невозможность достижения рафинирующего эффекта при распределении потоков в кристаллизаторе вследствие вовлечения подавляющего большинства неметаллических включений нижним циркуляционным потоком вглубь кристаллизатора.

Применительно к погружным стаканам с углами наклона боковых отверстий  $0\text{--}20^\circ$  можно отметить интересную закономерность. Вследствие развития циркуляционных потоков в верхней части кристаллизатора при установившемся процессе может наблюдаться искажение угла истечения на некоторую величину (порядка  $5\text{--}10^\circ$ ), что способствует дополнительному заглублению струи. Поэтому, выбирая угол наклона отверстий погружного стакана, следует делать поправку на развитие этого явления и корректировать закладываемый в конструкцию стакана угол в сторону уменьшения.

Так, характер истечения металла при использовании погружного стакана с углом раскрытия боковых отверстий  $-5^\circ$  сходен с погружным стаканом с углом раскрытия  $0^\circ$ , так как за счет корректировки угла движения жидкостной струи ей присущи все те же закономерности.

Говоря о характере истечения металла в кристаллизаторе при использовании погружных стаканов с «отрицательным» углом раскрытия боковых отверстий от  $-10^\circ$  до  $-20^\circ$ , следует отметить, что он принципиально отличается от описанных выше (рис. 2).

Рассматривая погружной стакан с углом раскрытия  $-10^\circ$ , следует отметить, что поток, выходящий из выпускного отверстия погружного стакана, движется под поверхностью мениска металла в направлении верхнего угла кристаллизатора. Достигая свободной

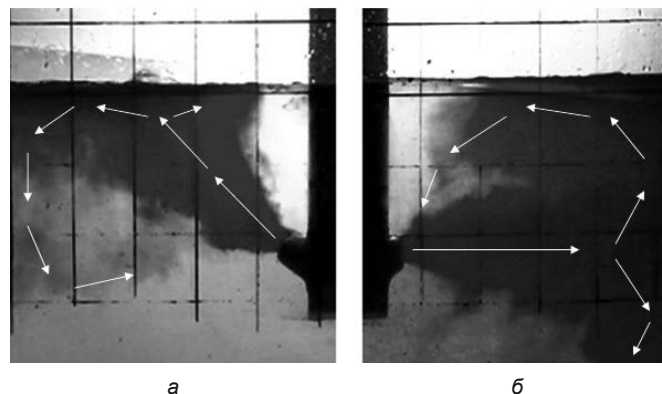


Рис. 2. Сравнение распределения потоков стали по сечению кристаллизатора при использовании погружного стакана с углом раскрытия  $-20^\circ$  (а);  $0^\circ$  (б)

поверхности, он формирует одну зону рециркуляции, которая является обратной по направлению, нежели в рассматриваемых ранее конструкциях. Так, рециркуляция происходит в направлении от погружного стакана, в то время как конструкции погружных стаканов, описанные ранее, обеспечивали формирование двух зон обратной рециркуляции по направлению к погружному стакану (рис. 1, а). Применительно к исследуемым условиям разливки в зоне мениска получают развитие процессы волнообразования, влияющие на качество поверхности сляба.

Развитие процессов волнообразования в зоне мениска объясняется высокой скоростью движения потоков стали и их столкновением непосредственно под уровнем налива. При этом на мениске возникают стоячие волны, которые приводят к оголению металла в определенных зонах и нарушению теплоотвода. Как следствие, в этих зонах возможно прилипание заготовки к стенкам кристаллизатора и ухудшение качества поверхности получаемого непрерывнолитого сляба. Возможно также разрушение твердой корочки и вытекание жидкой стали к стенке кристаллизатора.

Разливка через погружной стакан с углом раскрытия  $-20^\circ$  (рис. 1, б), характеризуется еще большим развитием процессов волнообразования в зоне мениска, которое возникает вследствие прямого взаимодействия потока, истекающего из погружного стакана с узкой стенкой кристаллизатора. В результате этого формируется циркуляционный поток, который заполняет всю зону погружения стакана.

Рассматривая возможность применения погружных стаканов с «отрицательными» углами раскрытия боковых отверстий следует отметить, что использование углов раскрытия боковых отверстий от  $-20^\circ$  до  $-30^\circ$  нецелесообразно, так как развитие волновых процессов находится за пределами допустимого уровня. Использование погружных стаканов с углами от  $-10^\circ$  до  $-15^\circ$  возможно при условии достаточного уровня налива металла в кристаллизаторе. При этом в силу специфики распределения жидкостных потоков погружные стаканы с таким углом раскрытия выпускных отверстий обладают следующими преимуществами:

- обеспечение необходимого подогрева металла в углах кристаллизатора и в верхней части кристаллизатора;

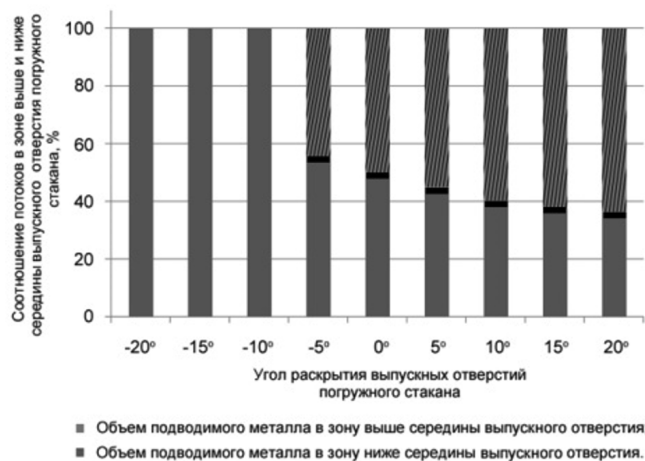


Рис. 3. Распределение потоков металла в кристаллизаторе шириной 1500 мм

– картина распределения потоков способствует более полному удалению неметаллических включений, вследствие того, что весь объем металла проходит непосредственно под мениском;

– исключена возможность дополнительного подвода стали верхним циркуляционным потоком обратно в зону выпускных отверстий, что снижает интенсивность зарастания выпускных отверстий погружного стакана.

С точки зрения количественной оценки распределения жидкостных потоков в ванне кристаллизатора с шириной сляба 1500 мм, в работе получено процентное распределение верхнего и нижнего циркуляционных потоков в зависимости от угла раскрытия боковых отверстий (рис. 3).

Исходя из данных рис. 3, следует, что увеличение угла наклона отверстий погружного стакана от  $-20^\circ$  до  $-5^\circ$  влечет за собой кардинальное изменение ха-

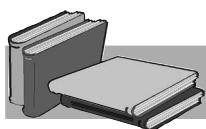
рактера истечения и распределения потоков внутри кристаллизатора. Так в этом диапазоне картина распределения потоков с одноциркуляционной изменяется до картины с двумя зонами верхней и нижней циркуляции, которые оказывают совместное влияние друг на друга.

## Выводы

Рациональной величиной угла раскрытия боковых отверстий погружного стакана следует считать значение  $10\text{--}15^\circ$ , которое может быть использовано при разливке слябов различной ширины вплоть до 1500–1600 мм.

Следует отметить, что ширина кристаллизатора в значительной степени определяет выбор угла раскрытия боковых отверстий погружного стакана. Так, для слябов небольшой ширины, использование погружных стаканов с углом раскрытия от  $-20^\circ$  до  $5^\circ$  нерационально, в силу взаимодействия вытекающего из погружного стакана потока с твердой корочкой металла, которая затвердевает на стенках кристаллизатора. В то же время для слябов шириной от 1500 мм значения угла раскрытия в диапазоне от  $-5^\circ$  до  $5^\circ$  обеспечивает оптимальные условия движения потоков в кристаллизаторе, колебаний на мениске, а также кристаллизации твердой корочки на узких стенках кристаллизатора.

При выборе оптимального угла раскрытия погружного стакана может быть рекомендована коррекция в сторону уменьшения угла раскрытия (около  $5\text{--}8^\circ$ ), которая учитывает то, что угол истечения струи в процессе разливки больше номинального угла раскрытия, так как на него оказывают влияние верхние циркуляционные потоки.

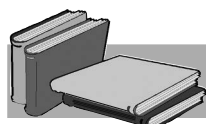


## ЛІТЕРАТУРА

1. Смирнов А.Н., Куберский С.В., Штепан Е.В. Непрерывная разливка стали. Донецк: ДонНТУ, 2011. 482 с.
2. Смирнов А.Н., Верзилов А.П. Погружные стаканы для непрерывной разливки слябов на МНЛЗ. ОАО «Черметинформация». Бюл. Черная металлургия. 2011. № 9. С. 42–51.
3. US Patent 4.819.840 Refractory Submerged Pouring Nozzle / Herman Lax; Assignee Thyssen Stahl Aktiengesellschaft, Duisburg, Fed. Rep. of Germany; Appl. No. 72,088; Filed Jul. 10.1987; Date of Patent Apr. 11.1989.
4. US Patent 5.785.880 Submerged Entry Nozzle / Lawrence John Heaslip, James Derek Dorricott; Assignee Vesuvius USA, Pittsburgh, PA; Appl. No. 233,049; Filed Apr. 25.1994; Date of Patent Jul. 28.1998.
5. US Patent 6.027.051 Casting Nozzle with Diamondback Interval Geometry and Multipart Casting Nozzle with Varying Effective Discharge Angles / Lawrence John Heaslip, James Derek Dorricott; Assignee Vesuvius Crucible Company, Wilmington, Del.; Appl. No. 08/935,089; Filed Sep. 26.1997; Date of Patent Feb. 22.2000.
6. US Patent 6.464.154B1 Casting Nozzle with Diamondback Interval Geometry and Multipart Casting Nozzle with Varying Effective Discharge Angles and Method for Flowing Liquid Metal Through Same / Lawrence John Heaslip, James Derek Dorricott; Assignee Vesuvius Crucible Company, Wilmington, DE (US); Appl. No. 09/881,138; Filed Jun. 14.2001; Date of Patent Oct. 15.2002.
7. US Patent 7.363.959B2 Submerged Entry Nozzle with Installable Parts / Robert C. Hanna, Kirby Joe Teeter; Assignee Nucor Corporation, Charlotte, NC (US); Appl. No. 11/333,780; Filed Jun. 17.2006; Date of Patent Apr. 29.2008.
8. US Patent 2007/0241142A1 Submerged Entry Nozzle / James L. McIntosh, Mark C. Pole; Assignee Nucor Corporation, Charlotte, NC (US); Appl. No. 11/763,666; Filed Jun. 15.2007; Date of Patent Oct. 18.2007.

9. US Patent 5.944.261 Casting Nozzle with Multi-stage Flow Division / Lawrence John Heaslip, James Derek Dorricott; Assignee Vesuvius Crucible Company, Wilmington, Del; Appl. No. 08/725,589; Filed Oct. 3.1996; Date of Patent Aug. 31.1999.
10. US Patent 5.961.874 Flat Formed Submerged Entry Nozzle for Continuous Casting of Steel / Etsuhiro Hasebe, Tetsuro Fushimi, Tatsuya Shimoda, Yoichiro Mochizuki, Tadasu Takigava, Toshihiko Murakami, Sei Hiraki; Assignee Toshiba Ceramics Co., Ltd., Tokio, Sumitomo Metal Industries, Ltd., Osaka, both of Japan; Appl. No. 09/045,869; Filed Mar. 23.1998; Date of Patent Oct. 5.1999.
11. *Mazumdar D., Guthrie R.I.* The Physical and Mathematical Modeling of Continuous Casting Systems. *ISIJ International*. 1999. Vol. 39. № 3. P. 525–548.

Надійшла 11.06.2019



## REFERENCES

1. *Smirnov, A.N., Kubersky, S.V., Stepan, E.V.* (2011). Continuous casting of steel. Donetsk: DonNTU, 482 p. [in Russian].
2. *Smirnov, A.N., Verzilov, A.P.* (2011). SEN for continuous casting of slabs on CCM. *Chermetinformatsiya OJSC. Bul. Ferrous metallurgy*, no. 9, pp. 42–51 [in Russian].
3. US Patent 4.819.840 Refractory Submerged Pouring Nozzle. Herman Lax; Assignee Thyssen Stahl Aktiengesellschaft, Duisburg, Fed. Rep. of Germany; Appl. No. 72,088; Filed Jul. 10.1987; Date of Patent Apr. 11.1989.
4. US Patent 5.785.880 Submerged Entry Nozzle. Lawrence John Heaslip, James Derek Dorricott; Assignee Vesuvius USA, Pittsburgh, PA; Appl. No. 233,049; Filed Apr. 25.1994; Date of Patent Jul. 28.1998.
5. US Patent 6.027.051 Casting Nozzle with Diamond-back Interval Geometry and Multi-part Casting Nozzle with Varying Effective Discharge Angles. Lawrence John Heaslip, James Derek Dorricott; Assignee Vesuvius Crucible Company, Wilmington, Del.; Appl. No. 08/935,089; Filed Sep. 26.1997; Date of Patent Feb. 22.2000.
6. US Patent 6.464.154B1 Casting Nozzle with Diamond-back Interval Geometry and Multi-part Casting Nozzle with Varying Effective Discharge Angles and Method for Flowing Liquid Metal Through Same. Lawrence John Heaslip, James Derek Dorricott; Assignee Vesuvius Crucible Company, Wilmington, DE (US); Appl. No. 09/881,138; Filed Jun. 14.2001; Date of Patent Oct. 15.2002.
7. US Patent 7.363.959B2 Submerged Entry Nozzle with Installable Parts. Robert C. Hanna, Kirby Joe Teeter; Assignee Nucor Corporation, Charlotte, NC (US); Appl. No. 11/333,780; Filed Jun. 17.2006; Date of Patent Apr. 29.2008.
8. US Patent 2007/0241142A1 Submerged Entry Nozzle. James L. McIntosh, Mark C. Pole; Assignee Nucor Corporation, Charlotte, NC (US); Appl. No. 11/763,666; Filed Jun. 15.2007; Date of Patent Oct. 18.2007.
9. US Patent 5.944.261 Casting Nozzle with Multi-stage Flow Division. Lawrence John Heaslip, James Derek Dorricott; Assignee Vesuvius Crucible Company, Wilmington, Del; Appl. No. 08/725,589; Filed Oct.3.1996; Date of Patent Aug. 31.1999.
10. US Patent 5.961.874 Flat Formed Submerged Entry Nozzle for Continuous Casting of Steel. Etsuhiro Hasebe, Tetsuro Fushimi, Tatsuya Shimoda, Yoichiro Mochizuki, Tadasu Takigava, Toshihiko Murakami, Sei Hiraki; Assignee Toshiba Ceramics Co., Ltd., Tokio, Sumitomo Metal Industries, Ltd., Osaka, both of Japan; Appl. No. 09/045,869; Filed Mar. 23.1998; Date of Patent Oct. 5.1999.
11. *Mazumdar, D., Guthrie, R.I.* (1999). The Physical and Mathematical Modeling of Continuous Casting Systems. *ISIJ International*, Vol. 39, no. 3, pp. 525–548.

Received 11.06.2019

**Анотація**

**О.П. Верзілов**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: verzilovalex@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0463-5006>

**А.А. Горшкова**, інженер I категорії, e-mail: mlu@ptima.kiev.ua

**Ю.О. Смірнов**, канд. екон. наук, доц., пров. інженер

**А.Р. Верзілова**, інженер I категорії

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України  
(Київ, Україна)*

## **Дослідження на фізичній моделі впливу величини кута розкриття випускних отворів занурених стаканів на характер витікання сталі у кристалізаторі машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ)**

*При проектуванні конструкції зануреного стакану для умов конкретного металургійного виробництва окрему увагу приділяють формі і куту розкриття бічних отворів. Форма випускних отворів визначає масову витрату сталі і форму струменя, а кут розкриття бічних отворів визначає кут витікання струменя металу і весь характер руху потоків металу в кристалізаторі, кількість і спрямованість циркуляційних потоків.*

*В результаті проведених досліджень було виявлено вплив кута розкриття вихідних отворів зануреного стакану на характер руху потоків всередині кристалізатора і встановлено оптимальний кут розкриття його бічних отворів.*

*Для цього на фізичній моделі було вивчено процеси витікання металу в кристалізаторі слябових машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) при зміні кута розкриття бічних отворів зануреного стакану в діапазоні від  $-20^\circ$  до  $20^\circ$  з кроком  $5^\circ$ . При цьому було відзначено існування двох принципово різних картин витікання металу в кристалізаторі, які характеризуються однією або двома зонами циркуляції. Зміна одноциркуляційної картини на двохциркуляційну спостерігається в діапазоні від  $-10^\circ$  до  $-5^\circ$ .*

*Встановлено, що раціональною величиною кута розкриття бічних отворів зануреного стакану є значення  $10-15^\circ$ , яке може бути використано при розливанні слябів різної ширини аж до  $1500-1600$  мм. При виборі оптимального кута розкриття зануреного стакану може бути рекомендовано корекцію у бік зменшення кута розкриття (близько  $5-8^\circ$ ), яка враховує те, що кут витікання струменя в процесі розливання більше номінального кута розкриття, оскільки на нього впливають верхні циркуляційні потоки.*

*Ширина кристалізатора значною мірою визначає вибір кута розкриття бічних отворів зануреного стакану. Так, для слябів невеликої ширини, використання занурених стаканів з кутом розкриття від  $-20^\circ$  до  $5^\circ$  нераціонально в силу взаємодії потоків сталі, які витікають з бічних отворів зануреного стакану з твердою коринкою металу, яка твердне на стінках кристалізатора. У той же час для слябів шириною від  $1500$  мм значення кута розкриття у діапазоні від  $-5^\circ$  до  $5^\circ$  забезпечує оптимальні умови руху потоків в кристалізаторі, коливань на меніску, а також кристалізації твердої коринки на вузьких стінках кристалізатора.*

**Ключові слова**

*Машина безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), кристалізатор, занурений стакан, кут нахилу бічних отворів, зона циркуляції, сляб.*

**Summary**

**A.P. Verzilov**, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, e-mail: verzilovalex@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0463-5006>

**A.A. Gorshkova**, Engineer of 1 category, e-mail: mlu@ptima.kiev.ua

**Yu.A. Smirnov**, PhD (Econom.), Associate Professor, Leading Engineer

**A.R. Verzilova**, Engineer of 1 category

*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)*

## **Study of the influence of opening angle of the outlet holes of submerged entry nozzles on the nature of the outflow of steel in the mold of continuous casting machine (CCM) on a physical model**

*When designing the submerged entry nozzle (SEN) for the conditions of a particular metallurgical production, special attention is paid to the shape and angle of opening of the side holes. The shape of the outlet holes determines the mass flow rate of steel and the shape of the jet, and the opening angle of the side holes determines the angle of flow of the metal jet and the whole pattern of movement of the metal flows in the mold, number and direction of the circulation flows.*

*As a result of the research, it was revealed the influence of the opening angle of the outlet holes of the SEN on the nature of the flow inside the mold and established the optimum opening angle of its side openings.*

*The processes of metal outflow in the mold of slab continuous casting machines (CCM) were studied on the physical model while changing the opening angle of the side holes of the SEN in the range from  $-20^\circ$  to  $20^\circ$  with a step of  $5^\circ$ . In this case, it was noted the existence of two fundamentally different patterns of metal outflow in the mold, which are characterized by one or two circulation zones. The change in one-circulation pattern to a two-circulation one is observed in the range from  $-10^\circ$  to  $-5^\circ$ . It was established, that the rational value of the angle of opening of the side holes of the SEN is  $10-15^\circ$ , which can be used for casting slabs of various widths up to 1500–1600 mm. When choosing the optimal opening angle of the SEN, a correction towards decreasing the opening angle (about  $5-8^\circ$ ) can be recommended, which takes into account that the jet outflow angle during casting is greater than the nominal opening angle, as it is influenced by upper circulation flows.*

*The width of the mold largely determines the choice of the opening angle of the side holes of the SEN. Therefore, for slabs of small width, the use of SEN with a disclosure angle from  $-20^\circ$  to  $5^\circ$  is irrational, due to the interaction of the flows flowing out of the SEN with a solid metal crust, which is crystallized on the walls of the mold. At the same time for slabs with a width of 1500 mm the opening angle in the range from  $-5^\circ$  to  $5^\circ$  provides optimal conditions for the movement of flows in the mold, oscillations on the meniscus, as well as solidification of the solid crust on the narrow walls of the mold.*

**Keywords**

*Continuous casting machine (CCM), mold, submerged entry nozzle (SEN), angle of inclination of side holes, circulation zone, slab.*