УДК 669.01.53:621.74.047

А.П. Верзилов, канд. техн. наук, науч. сотр., e-mail: verzilovalex@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0463-5006

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

Физическое моделирование асимметричного истечения металла в кристаллизатор слябовой машины непрерывного литья заготовок

Эксплуатационный ресурс погружного стакана может быть снижен вследствие зарастания или размывания его полости, а также эрозионного износа в зоне шлакового пояса. При этом зарастание погружного стакана является серьезной проблемой, так как носит непрерывный характер и оказывает существенное влияние на гидродинамическую картину истечения металла внутри кристаллизатора слябовой машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), делая ее асимметричной. Это обстоятельство в свою очередь сказывается на качестве получаемой непрерывнолитой заготовки.

В процессе непрерывной разливки полость погружного стакана постепенно зарастает, и характер истечения потоков изменяется, что приводит к нарушению технологического процесса и может вызывать волнообразование на мениске металла, а также подмывание корочки затвердевающего металла на узких стенках кристаллизатора. Визуальное подтверждение серьезного нарушения картины распределения потоков в кристаллизаторе возможно уже на самом последнем этапе разливки непосредственно перед заменой погружного стакана.

Исходя из этого, в статье представлены исследования, направленные на изучение процессов истечения металла в кристаллизаторе в середине или конце разливки при использовании погружного стакана, в полости которого наблюдаются отложения включений.

В статье представлены результаты физического моделирования процессов поведения жидкой стали в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ при зарастании полости погружного стакана включениями для нескольких наиболее характерных ситуаций. Исследован процесс образования воронкообразных вихрей в кристаллизаторе, а также выявлены основные негативные последствия этого явления. Возникновение воронкообразных вихрей следует связывать с развитием процессов зарастания, а именно асимметричным характером движения металла в кристаллизаторе. Вследствие этого вглубь жидкой ванны вовлекаются частички шлакообразующей смеси и остаточные включения.

Ключевые слова: *машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), кристаллизатор, погружной стакан, зарастание, асимметричное истечение, сляб.*

В процессе непрерывной разливки стали внутренняя полость погружного стакана и выпускных отверстий может претерпевать значительные изменения в связи с развитием процессов размывания или зарастания как традиционным путем [1–3, 8], так и вследствие отложения металлических частиц, вызванных разбрызгиванием металла [4]. При этом характер истечения стали в кристаллизаторе также в значительной степени меняется в каждый конкретный момент процесса разливки. Такие изменения могут вызывать как незначительные отклонения от нормального течения потоков, так и приводить к серьезнейшим нарушениям технологического процесса. Так, в промышленных условиях при разливке стали зеркало металла в кристаллизаторе, как правило, практически неподвижно. Тем не менее, если возмущения поверхности видно визуально, то это свидетельствует о том, что течение технологического процесса существенно нарушено, и значит, погружной стакан зарос и нуждается в срочной замене [5]. Исходя из этого, очень важно понимать каким образом протекают процессы зарастания, а также какими явлениями они сопровождаются, чтобы сформировать представление о том, на каком этапе следует вывести погружной стакан из эксплуатации, чтобы избежать аварийных ситуаций.

В настоящей статье представлены результаты исследований по установлению гидродинамической картины в кристаллизаторе при физическом (водном) моделировании процессов частичного зарастания выпускных отверстий погружного стакана. Необходимость таких исследований объясняется тем, что деформация формы и уменьшение площади выпускных отверстий наибольшим образом оказывают влияние на характер истечения металла в кристаллизаторе (рис. 1) и качество поверхности сляба. При этом в процессе разливки характер распределения потоков в кристаллизаторе претерпевает значительные

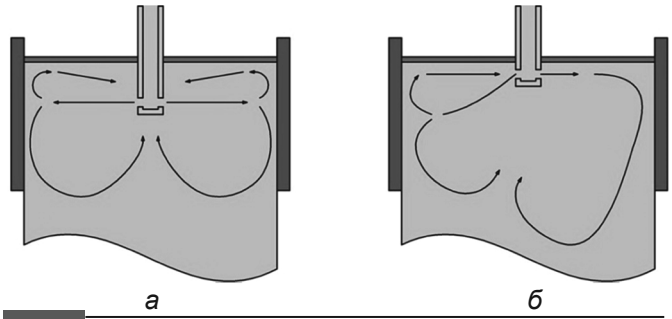

Рис. 1. Характер движения потоков металла в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ: *а* – в начальный момент использования погружного стакана; *б* – при зарастании погружного стакана в процессе разливки

изменения [1, 2, 5–6]. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе конструкции погружного стакана для условий конкретного металлургического производства [1].

Для развития существующих представлений и качественной оценки наблюдаемых явлений широкое распространение получило физическое моделирование, позволяющее, в том числе, визуализировать движение потоков в жидкой ванне кристаллизатора как в начальный момент времени, так и в процессе разливки.

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 выступили критерий Фруда и Вебера. В качестве рабочей жидкости, моделирующей жидкую сталь, использовалась вода при температуре 18–25 °С [7]. Имитация покровного шлака на поверхности металла в кристаллизаторе осуществлялась с помощью силиконового или трансформаторного масла, которые имеют высокое поверхностное натяжение.

Моделирование процессов зарастания погружного стакана, которое вызывает асимметричный подвод металла в кристаллизатор, производили для трех основных ситуаций, предваряющих замену погружного стакана:

– уменьшение площади левого бокового отверстия погружного стакана на 20 %, правого – на 80 % при зарастании верхней части выпускных отверстий (рис. 2);

– уменьшение площади левого бокового отверстия погружного стакана на 20 %, правого – на 80 % при зарастании нижней части выпускных отверстий (рис. 3);

– уменьшение площади левого бокового отверстия погружного стакана на 80 % в верхней части, правого – на 80 % в нижней (рис. 4).

Первый случай моделирует достаточно частую ситуацию, когда верхний циркуляционный поток, возвращаясь к зоне выпускных отверстий, способствует их дополнительному затягиванию сверху. Применительно к моделируемой ситуации, жидкостный поток в левой части кристаллизатора характеризуется большей интенсивностью, нежели в правой, что влечет за собой неравномерное затвердевание корочки стали на узких стенках. При этом в левой части сила взаимодействия с узкой стенкой очень высока, поэтому отраженный от боковой стенки верхний циркуляционный поток способствует развитию на поверхности волновых явлений. В правую верхнюю часть кристаллизатора жидкостный поток поступает по остаточному принципу, так как из правого выпускного отверстия он направляется на нижний горизонт кристаллизации.

Во втором случае было отмечено, что в результате зарастания нижней части боковых отверстий

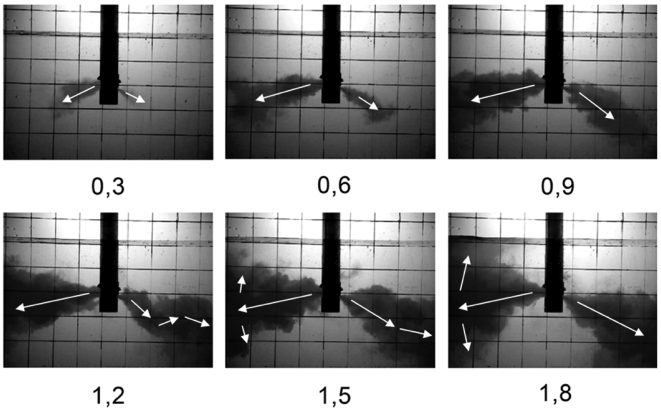

Рис. 2. Кинограмма распределения потоков в ванне кристаллизатора при уменьшении площади левого бокового отверстия погружного стакана на 20 %, правого – на 80 % при зарастании верхней части выпускных отверстий, с

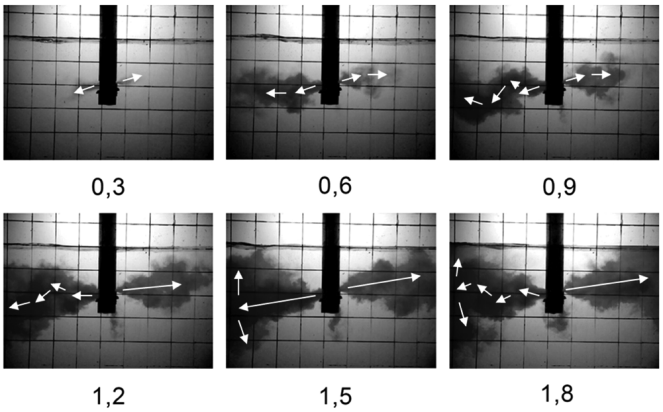

Рис. 3. Кинограмма распределения потоков в ванне кристаллизатора при уменьшении площади левого бокового отверстия погружного стакана на 20 %, правого – на 80 % при зарастании нижней части выпускных отверстий, с

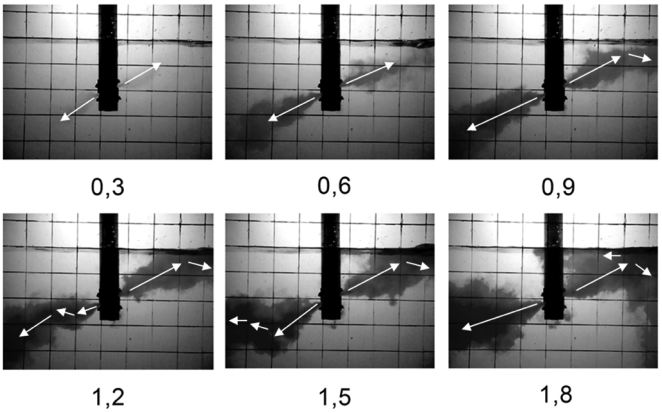

Рис. 4. Кинограмма распределения потоков в ванне кристаллизатора при уменьшении площади левого бокового отверстия погружного стакана на 80 % в верхней части, правого – на 80 % в нижней, с

погружного стакана, весь поток направляется в верхнюю часть кристаллизатора. При этом левая струя, истекающая из бокового отверстия погружного стакана, характеризовалась *S*-образным расконцентрированным характером течения. В левой верхней части кристаллизатора также создавались предпосылки для возмущения поверхности, и наблюдалось волнообразование.

В третьем случае, истечение из погружного стакана характеризуется наибольшими отклонениями от нормального течения технологического процесса. Как и в предыдущем варианте, наблюдается *S*-образный характер истечения струй. Также струя, истекающая из правого бокового отверстия, двигаясь в направлении верхнего угла кристаллизатора, создает в нем предпосылки к существенному развитию процессов волнообразования.

В ходе исследований асимметричного подвода стали в кристаллизатор МНЛЗ было также отмечено явление образования под зеркалом металла вихрей (рис. 5).

Установлено, что при развитии вихрей происходит затягивание шлакообразующей смеси вглубь жидкой ванны кристаллизатора, что может служить причиной дополнительного загрязнения стали шлаковыми включениями. Следовательно, на практике необходимо предупреждать образование вихревых явлений в кристаллизаторе.

Развитие вихрей следует связывать с нарушением рациональной гидродинамической картины движения потоков металла, когда в процессе литья в узкий промежуток времени формируются условия для их возникновения.

Как показали результаты физического моделирования, возникновение вихрей наблюдалось даже при перекрытии одного из выпускных отверстий более чем на 25 % от его исходного сечения. Так, при асимметричном течении рабочей жидкости в кристаллизаторе вихрь формировался уже через некоторое время после начала истечения в зоне с заросшим выпускным отверстием. Схематическое представление воронкообразования приведено на рис. 6.

Развитие интенсивного вихря, пронизывающего весь столб жидкости в кристаллизаторе, не происходило, вследствие захвата «хвоста» струей, вытекающей из выпускного отверстия. Следует обратить внимание, что от момента образования вихря до его затухания не представлялось возможным визуально зафиксировать данный процесс на поверхности масла в кристаллизаторе.

В результате исследований показано, что в процессе зарастания погружного стакана гидродинамическая картина распределения потоков может измениться кардинальным образом. При этом на последней стадии процесса зарастания такое изменение всегда будет сопровождаться колебаниями поверхности жидкости в зоне мениска. Однако визуальное подтверждение этого обстоятельства влечет за собой необходимость замены погружного стакана. Тем не менее, качество получаемой стали будет достаточно низким вследствие развития всех явлений,

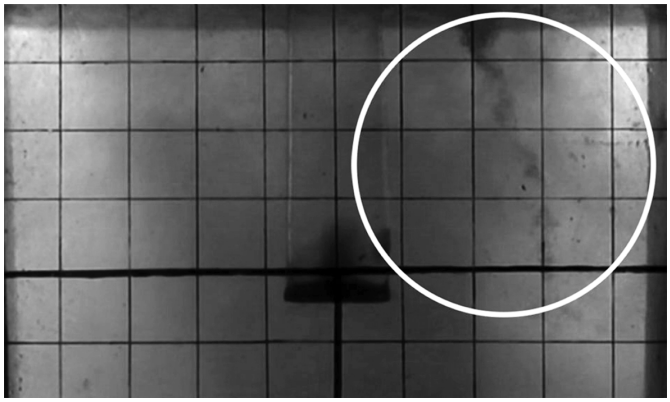

Рис. 5. Явление вихря при асимметричном характере истечения моделирующей жидкости из погружного стакана

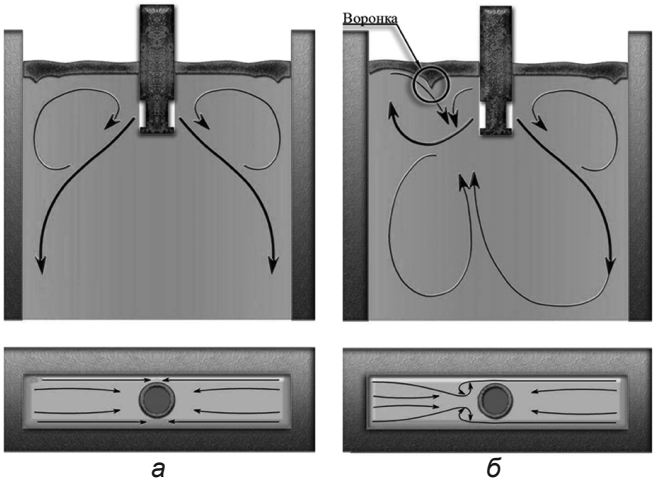

Рис. 6. Схематическое представление движения потоков в кристаллизаторе: *а* – симметричное истечение; *б* – асимметричное истечение (образование воронкообразного вихря)

предшествующих выводу из эксплуатации погружного стакана.

В частности, одним из важных явлений, которое визуализировать в процессе разливки не представляется возможным, является развитие вихрей под поверхностью металла в кристаллизаторе. Их возникновение следует связывать с развитием процессов зарастания, а именно асимметричным характером движения металла в кристаллизаторе. Вследствие этого вглубь жидкой ванны вовлекаются частички шлакообразующей смеси и остаточные неметаллические включения.

Совокупность всех приведенных выше обстоятельств позволяет говорить о серьезной проблеме, которая может быть решена только путем создания погружного стакана, который должен учитывать не только условно идеальные условия разливки, но и содействовать минимизации проявлений процессов зарастания в части движения потоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Смирнов А.Н., Верзилов А.П.* Погружные стаканы для непрерывной разливки слябов на МНЛЗ. *ОАО «Черметинформация». Бюл. Черная металлургия.* 2011. № 9. С. 42–51.
2. *Rakeps K.G., Thomas B.G.* Clogging in Continuous Casting Nozzles. *78th Steelmaking Conf. Proc., Warrendale, PA,* 1995. Vol. 78. P. 723–734.
3. *Аксельрод Л.М.* Повышение стойкости графитсодержащих погружных стаканов для МНЛЗ. *Огнеупоры.* 1996. № 6. С. 27–30.
4. *Смирнов А.Н., Ефимова В.Г., Ухин В.Е., Верзилов А.П.* Исследование отложений, образующихся внутри погружного стакана при разливке на слябовой МНЛЗ. *Сб. научн. трудов «Современные огнеупоры и технологии в производстве стали». По материалам XIX международной научно-технической конференции «Современные огнеупоры: ресурсосбережение и применение в металлургических технологиях».* Донецк: Ноулидж, 2013. С. 92–98.
5. *Смирнов А.Н., Куберский С.В., Штепан Е.В.* Непрерывная разливка стали. Донецк: ДонНТУ, 2011. 482 с.
6. *Thomas B.G., Yuan Q., Zhang L., Vanka S.P.* Flow Dynamics and Inclusion Transport in Continuous Casting of Steel. *NSF Design, Service, and Manufacturing Grantees and Research Conf. Proc.* / R.G. Reddy (ed.). 2003. P. 2328–2362.
7. *Mazumdar D., Guthrie R.I.* The Physical and Mathematical Modeling of Continuous Casting Systems. *ISIJ International.* 1999. Vol. 39. № 3. P. 525–548.
8. *Аксельрод Л.М., Паршин В.М., Мазуров Е.Ф.* Механизм зарастания погружных стаканов при непрерывной разливке стали. *Сталь.* 2007. № 4. С. 30–33.

Поступила 08.05.2019

REFERENCES

1. *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].
2. *Rakeps, K.G., Thomas, B.G.* (1995). Clogging in Continuous Casting Nozzles. *78th Steelmaking Conf. Proc.*, *Warrendale, PA.* Vol. 78, pp. 723–734 [in English].
3. *Axelrod, L.M.* (1996). Increase of durability of graphite-containing SEN for CCM. *Refractories,* no. 6, pp. 27–30 [in Russian].
4. *Smirnov, A.N., Efimova, V.G., Ukhin, V.E., Verzilov, A.P.* (2013). Investigation of sediments formed inside the SEN during casting on a slab CCM. *Com. scientific works "Modern refractories and technology in the production of steel." According to the materials of the XIX International Scientific-Technical Conference "Modern refractories: resource saving and application in metallurgical technologies".* Donetsk: Noulidzh, pp. 92–98 [in Russian].
5. *Smirnov, A.N., Kubersky, S.V., Shtepan, E.V.* (2011). Continuous casting of steel. Donetsk: DonNTU, 482 p. [in Russian].
6. *Thomas, B.G., Yuan, Q., Zhang, L., Vanka, S.P.* (2003). Flow Dynamics and Inclusion Transport in Continuous Casting of Steel. *NSF Design, Service, and Manufacturing Grantees and Research Conf. Proc.*, R.G. Reddy, ed., pp. 2328–2362 [in English].
7. *Mazumdar, D., Guthrie, R.I.* (1999). The Physical and Mathematical Modeling of Continuous Casting Systems. *ISIJ International.* Vol. 39, no. 3, pp. 525–548 [in English].
8. *Axelrod, L.M., Parshin, V.M., Mazurov, E.F.* (2007). The process of clogging SEN with continuous casting of steel. *Steel,* no. 4, pp. 30–33 [in Russian].

Received 08.05.2019

Анотація

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

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

Фізичне моделювання асиметричного витікання металу у кристалізатор слябової машини безперервного лиття заготовок

Експлуатаційний ресурс зануреного стакана може бути знижений внаслідок заростання або розмивання його порожнини, а також ерозійного зносу в зоні шлакового пояса. При цьому заростання зануреного стакана є серйозною проблемою, оскільки носить безперервний характер і має суттєвий вплив на гідродинамічну картину витікання металу всередині кристалізатора слябової машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), роблячи її асиметричною. Ця обставина в свою чергу позначається на якості отримуваної безперервнолитої заготовки.

У процесі безперервного розливання порожнина зануреного стакана поступово заростає, і характер витікання потоків змінюється, що призводить до порушення технологічного процесу і може викликати хвилеутворення на меніску металу, а також підмивання кірочки металу, що твердіє на вузьких стінках кристалізатора. Візуальне підтвердження серйозного порушення картини розподілу потоків в кристалізаторі можливо вже на останньому етапі розливання безпосередньо перед заміною зануреного стакана.

Виходячи з цього, в статті представлено дослідження, спрямовані на вивчення процесів витікання металу в кристалізаторі в середині або кінці розливання при використанні зануреного стакана, в порожнині якого спостерігаються відкладення включень.

У статті представлено результати фізичного моделювання процесів поведінки рідкої сталі в кристалізаторі слябової МБЛЗ при заростанні порожнини зануреного стакана включеннями для декількох найбільш характерних ситуацій. Досліджено процес утворення воронкоподібних вихорів в кристалізаторі, а також виявлено основні негативні наслідки цього явища. Виникнення воронкоподібних вихорів слід пов'язувати з розвитком процесів заростання, а саме асиметричним характером руху металу в кристалізаторі. Внаслідок цього вглиб рідкої ванни залучаються частинки шлакоутворюючої суміші і залишкові включення.

Ключові слова

Машина безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), кристалізатор, занурений стакан, заростання, асиметричне витікання, сляб.

Summary

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

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

Physical modeling of the asymmetric flow of the metal in the mold slab of continuous casting machine

The service life of the submerged entry nozzle (SEN) can be reduced due to clogging or erosion of its cavity, as well as erosion wear in the zone of the slag belt. At the same time, clogging of the SEN is a serious problem, since it is of a continuous nature and has a significant impact on the hydrodynamic pattern of metal outflow inside the mold of the slab continuous casting machine (CCM), making it asymmetric. This circumstance, in turn, affects the quality of the continuous cast billet.

In the process of continuous casting, the cavity of the SEN gradually grows and the nature of the outflow of flows changes, which leads to disruption of the technological process and can cause wave formation on the meniscus of the metal, as well as washing away the crust of the metal on the narrow walls of the mold. Visual confirmation of a serious violation of the pattern of flow distribution in the mold is possible already at the very last stage of the casting immediately before replacing SEN.

Based on this, the article presents studies aimed at studying the processes of metal outflow in the mold in the middle or end of casting using an SEN, in the cavity of which inclusions deposits are observed.

The article presents the results of physical modeling of the behavior of liquid steel in mold of slab CCM when the cavity of an SEN is clogging with inclusions for several of the most characteristic situations. The process of formation of funnel vortices in the mold was investigated, and the main negative consequences of this phenomenon were revealed. The occurrence of funnel vortices should be associated with the development of clogging processes, namely, the asymmetric nature of the movement of the metal in the mold. As a result, particles of mold powder mixture and residual inclusions are involved in the depth of the liquid bath.

Keywords

Continuous casting machine (CCM), mold, submerged entry nozzle (SEN), clogging, asymmetric flow, slab.