

Вместе с тем, повышенное содержание алюминия в стали остаточного затормаживает развитие реакции трансформации алюминатных включений, увеличивает концентрацию алюминия в алюминатах кальция, создает предпосылки для усиления процессов повторного окисления в процессе разливы, а также для образования глинозема при снижении температуры стали конца обработки на «печи-ковше» (1595-1610 °С) до температуры разливы на УНРС (1540-1565 °С).

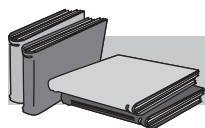
Содержание глинозема в продуктах раскисления зависит от соотношения концентрации алюминия и кислорода в расплаве. При соотношении концентрации алюминий-кислород, равном 25, образуются только включения глинозема ( $\alpha$ -корунд) [16].

Если учесть, что в мартеновском цехе ЗАО «Донецксталь-МЗ» для сталей марок: Ст3, А36/А36М, АВ, А, В, S235, S275, BVA, NVA, GLA такие условия как раскисление и модифицирования стали на установке «печь-ковш» в части расхода алюминия и силикокальциевой проволоки одинаковы и температурно-скоростные режимы разливы стали на слябовой УНРС также одинаковы, то образование глинозема в промежуточном ковше и отложение его на «седловине» стакана-дозатора и на конусе («носике») стопора-моноблока способствуют

относительно низкому остаточному содержанию кальция в металле, необходимого для модифицирования глинозема в алюминаты кальция; повышению содержания кислорода в металле промковша за счет развития вторичного окисления в результате подсоса кислорода через огнеупорную проводку (стальковш-промковш) и/или на поверхности металла из-за понижения уровня металла в промежуточном ковше.

### Вывод

С учетом вышеизложенного, для снижения количества плавок, разливающихся с затягиванием стакана-дозатора на УНРС мартеновского цеха, был скорректирован расход силикокальциевой проволоки (с 0,31 до 0,44 кг/т) в конце обработки стали на установке «ковш-печь». В результате данной корректировки снизилось количество плавок (марки стали: Ст3, А36/А36М, АВ, А, В, S235, S275, BVA, NVA, GLA), разливающихся на слябовой УНРС с устойчивым затягиванием стакана-дозатора до 2-3 % в месяц. Необходимо сказать, что при увеличении расхода силикокальциевой проволоки до 0,44 кг/т было достигнуто оптимальное соотношение  $CaO / Al$  при температурах разливы стали на слябовой УНРС мартеновского цеха ЗАО «Донецксталь-МЗ».



## ЛИТЕРАТУРА

1. Родионова И. Г., Бакланова О. Н. и др. О методах оценки коррозионной стойкости углеродистых и низколегированных трубных сталей в условиях эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов // *Металлы*. – 2005. – № 5. – С. 44-50.
2. Головкова Е. Н., Котельников Г. И. и др. Анализ процессов рафинирования стали от коррозионно-активных неметаллических включений применительно к условиям ОАО «Тагмет» // *Металлург*. – 2005. – № 5. – С. 51-54.
3. Сарычев А. В., Николаев О. А. и др. Опыт подготовки металла для разливы на сортовых МНЛЗ // *Сталь*. – 2007. – № 2. – С. 44-45.
4. Дюдкин Д. А., Бать С. Ю. и др. Производство стали на агрегате ковш-печь / Под ред. Дюдкина Д. А. – Донецк: ООО «Юго-Восток, ЛТД», 2003. – 300 с.
5. Алексеенко А. А., Байбекова Е. В., Кузнецов С. Н. и др. Влияние некоторых технологических факторов на разливы раскисленной алюминием стали на сортовой МНЛЗ // *Электрометаллургия*. – 2007. – № 2 – С. 2-7.
6. Клачков А. А., Печерица А. А. и др. Неметаллические включения в непрерывной заготовке котельной стали 20К при модифицировании кальцием // *Электрометаллургия*. – 2007. – № 2 – С. 7-10.
7. Дюдкин Д. А., Бать С. Ю. и др. Внепечная обработка расплава порошковыми проволоками / Под ред. Дюдкина Д. А. – Донецк: ООО «Юго-Восток, ЛТД», 2002. – 296 с.

УДК 669.01

**А. Н. Смирнов** (Донецкий национальный технический университет), **С. Л. Макуров** (Приазовский государственный технический университет)

## Химическая неоднородность и пути подавления внецентренной и зональной ликвации в крупных кузнечных слитках

Существенным недостатком крупного стального слитка является химическая неоднородность металла. В крупных слитках степень ликвации углерода колеблется от 50 до 150 % и может достигать такой величины, что металл донной и головной частей слитка будет соответствовать разным маркам стали [1]. Помимо углерода значительно

экспериментальным путем установлены пути подавления внецентренной и зональной ликвации в крупных кузнечных слитках, обеспечив низкое содержание серы, фосфора и цветных металлов (< 0,01 % их общей концентрации), а также кремния (< 0,05 %), применяя вакуумно-углеродное раскисление и доливку слитков

ликвируют сера и фосфор. В работе [2] показано, что на развитие ликвации влияет размер и форма слитка, температура металла, технология и скорость разливы,

химический состав стали, скорость охлаждения и другие факторы.

С увеличением диаметра слитка повышается продолжительность затвердевания, в результате чего увеличивается сегрегация примесей в стали, а также интенсивность образования ликватов. Зональная ликвация и ликваты образуются в поясе равноосных дендритов, то есть во внутренней части слитков за поясом столбчатых кристаллов.

Внецентренная ликвация в крупном кузнечном слитке представляет собой множество (до сотни) вытянутых послековки округлых «шнуров» диаметром от 2 до 10 мм и длиной 1-5 м, расположенных на 2/3 сечения и длины поковки с прибыльного конца. Известны случаи самопроизвольного разрушения готовых изделий из-за таких чрезмерно развитых «шнуров» [3]. При изготовлении поковки особую опасность представляют «шнуры», расположенные вблизи их наружной поверхности. С увеличением массы слитков «шнуры» растут в диаметре и в длину, представляя собой заполненные металлом вытянутые округлые полости, обогащенные ликвирующими примесями и почти не имеющие дендритной структуры. При ковке сокращается только диаметр этих «шнуров» (пятнистая ликвация в поперечном сечении), а сами они не устраняются.

Температура плавления участков внецентренной (шнуровой) ликвации (1250-1290 °С) существенно ниже аналогичной температуры основного металла. Отсутствие дендритной структуры в «шнуре» приводит к резкому снижению (провалу) показателей механических свойств поперечных образцов при попадании «шнура» в зону разрушения.

При исследовании разрезов 142-тонного кузнечного слитка в работе [4] было установлено, что «шнуры» Λ-образной химической неоднородности появляются на расстоянии 350-400 мм от поверхности слитка и периодически распространяются на глубину около 800-1000 мм по среднему радиусу темплета. Угол наклона «шнуров» к вертикальной оси переменный, он увеличивается по направлению к верхней части слитка. В нижней половине темплета они практически параллельны поверхности слитка, а в верхней – имеют наклон, достигающий в отдельных местах 60°.

Характерной особенностью является отличие границ ликвационной полосы (рис. 1). Со стороны изложницы

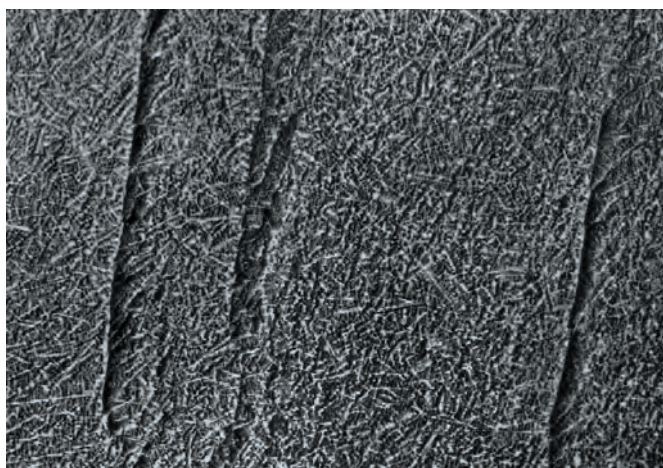


Рис. 1. Фрагмент макроструктуры поперечного разреза кузнечного слитка в районе «шнуров» внецентренной ликвации

эта полоса имеет четкую границу, а с противоположной – размытую. Такое строение «шнуров» свидетельствует о том, что они являются следами всплытия легкоплавких ликватов после их периодического накопления на границах твердо-жидкой и размытой жидко-твердой зоны затвердевающей стали. Движущиеся ликваты при этом растворяют часть ветвей дендритов и по пути перемещения вверх образуют каналы шнуровой ликвации.

Согласно М. Флемингу [5] шнуровая ликвация формируется в том случае, когда скорость потока ликватов в междендритном пространстве (в направлении роста твердой фазы) превышает скорость движения изотерм. В противном случае ликваты локализуются между осями дендритов. Траектория движения ликватов определяется, с одной стороны, перемещением границ затвердевания, подчиняющихся закону квадратного корня, с другой стороны, их всплыванием снизу вверх. Этим определяется квазипараболическая форма «шнуров». Внеосевая ликвация проявляется только на достаточном большом расстоянии от оси слитка, при котором усачодные перемещения жидкого металла сверху вниз еще не получают развития.

Область расположения «шнуров» внеосевой химической неоднородности определяется интенсивностью конвективных потоков жидкой стали в различных местах затвердевающего слитка. Чем сильнее интенсивность конвективных потоков, тем больше их смывающее действие на ликвационные выделения. В нижней, более охлаждаемой части слитка, где формируется зона осадочной кристаллизации, конвективное движение затухает раньше, что способствует накоплению ликватов и более раннему появлению ликвационных «шнуров».

Общеизвестными являются факты усиления внецентренной ликвации при затвердевании слитков спокойной стали, когда она перегрета и имеет повышенное содержание газов, а также при разливке стали в вакууме, когда происходит интенсивное выделение газов под влиянием разрежения. Выделение газов усиливает конвективные потоки и, соответственно, внецентренную ликвацию.

Нити внеосевой неоднородности в наибольшей степени обогащены серой (степень ликвации более 200 %) и значительно меньше углеродом и фосфором. Понижение содержания растворенной серы в стали возможно связыванием ее с редкоземельными элементами в тугоплавкие соединения. В последнем случае сульфидные включения скапливаются в конусе осаждения, а ликвационные «шнуры» сохраняются, но в виде светлых полос [6].

В работах [7-11] утверждается, что на формирование внецентренной ликвации сильное влияние оказывает кремний, степень ликвации которого в «шнурах» составляет 14-15 %. При исследовании ликвации кремния в слитках сталей 60С2 и 30ХГ2С в работе [7] было установлено, что ликвация последнего достигает 20 % и уменьшается при снижении содержания кремния.

В распределении содержания кремния в слитке выявлена четкая закономерность – содержание кремния так же, как и содержание углерода, повышается от основания – к верхней части и от края – к середине слитка. В слитках кремнистой стали 60С2 внеосевая и осевая неоднородности развиты значительно сильнее, чем в слитке углеродистой стали. Если в слитке углеродистой

стали «шнуры» распространены на 30-50 % высоты слитка, то в слитке кремнистой стали – до основания, при этом они расположены в несколько рядов. Со снижением содержания углерода и кремния степень развития внеосевой ликвации уменьшается.

Так, в слитке стали 30ХГ2С, содержащем (в %) 0,33 С и 0,78 Si, шнуры занимают 2/3 длины слитка и расположены в 1-2 ряда.

Очевидно, кремний, который увеличивает активность серы, понижает вязкость стали и расширяет ее

интервал температур кристаллизации способствует образованию ликвационных «шнуров» в дендритном каркасе.

В работе [8] утверждается, что для получения слитков легированной стали без заметных следов  $\Lambda$ -образной ликвации необходимо выбирать химический состав стали, руководствуясь следующим соотношением:

$$I = -1,022 \text{ Si} - 0,049 \text{ Mn} + 0,208 \text{ Mo}, \quad (1)$$

где  $I$  – интегральный параметр, значение которого должно стремиться к нулю для обеспечения производства слитков с минимальной ликвацией; кремний, марганец, молибден – содержание соответствующего элемента в %масс.

Рекомендуемое соотношение было экспериментально проверено на слитках массой от 13 до 400 т при вакуум-углеродном раскислении или раскислении кремнием. Наибольший уровень ликвации углерода отмечен в слитках массой 210 и 430 т (соответственно 38 и 41 %). Несмотря на сравнительно большой уровень ликвации углерода во всех опытных слитках  $\Lambda$ -образная ликвация серы практически отсутствовала.

На рис. 2 приведена фотография серного отпечатка опытного 13,3-тонного кузнечного слитка стали 25Х2НМФА с пониженным содержанием кремния (0,025 %). Металл подвергли вакуумно-углеродному раскислению, содержание серы составляло 0,015 %.

На серном отпечатке (рис. 2) продольного разреза опытного слитка полностью отсутствуют ликвационные «шнуры».

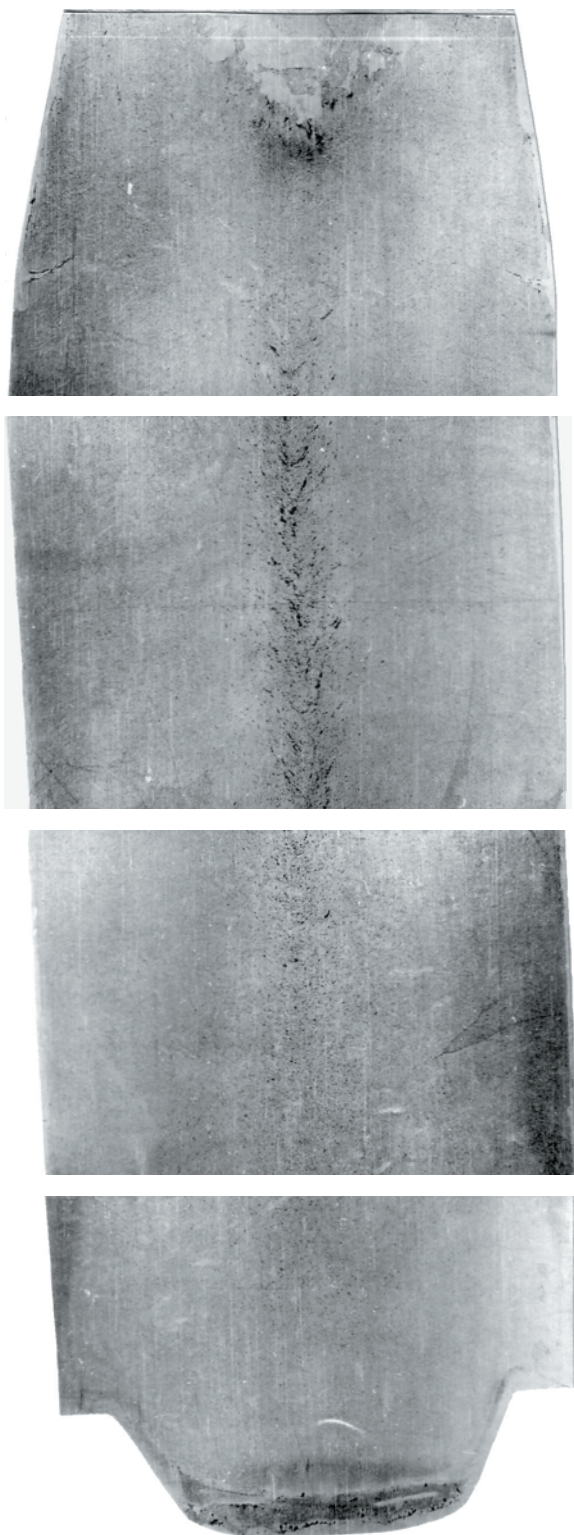
В то же время на серном отпечатке сравнительного слитка (рис. 3) с таким же содержанием серы, но с концентрацией кремния 0,34 %, видны характерные «шнуры» внецентральной ликвации.

Аналогичные результаты были получены при отливке 28,5-тонного слитка стали Р2МА [9]. Сталь выплавляли в 30-тонной основной мартеновской печи. В ковше металл не раскисляли. Химический состав готовой стали составлял (в %): С – 0,30; Mn – 0,48; Si – 0,03; Cr – 1,43; Mo – 0,63; V – 0,20; P – 0,010; S – 0,012; Cu – 0,10. По всем элементам, кроме кремния, полученный химсостав полностью соответствовал кислой мартеновской плавке, используемой для отливки и исследования сравнительных слитков. Эти слитки, как и опытный слиток, имели отношение  $H / D_{\text{ср}} = 1,5$ .

Опытный слиток из основной мартеновской стали отливали в вакуумной камере через промежуточный ковш с диаметром стаканчика 45 мм. Продолжительность отливки составляла 13 мин. Вакуумирование стали с углеродным раскислением проводили при таком же остаточном давлении, как и при отливке в вакууме слитков из кислой стали, а именно: в начале и в конце разливки – 332,5, в середине – 798,0 Па.

Результаты исследования макроструктуры опытного слитка показали, что он имеет слабовыраженное дендритное строение при отсутствии зоны столбчатой кристаллизации. Слиток, отлитый в вакууме с углеродным раскислением, оказался более плотным по сравнению со слитком обычной разливки на воздухе.

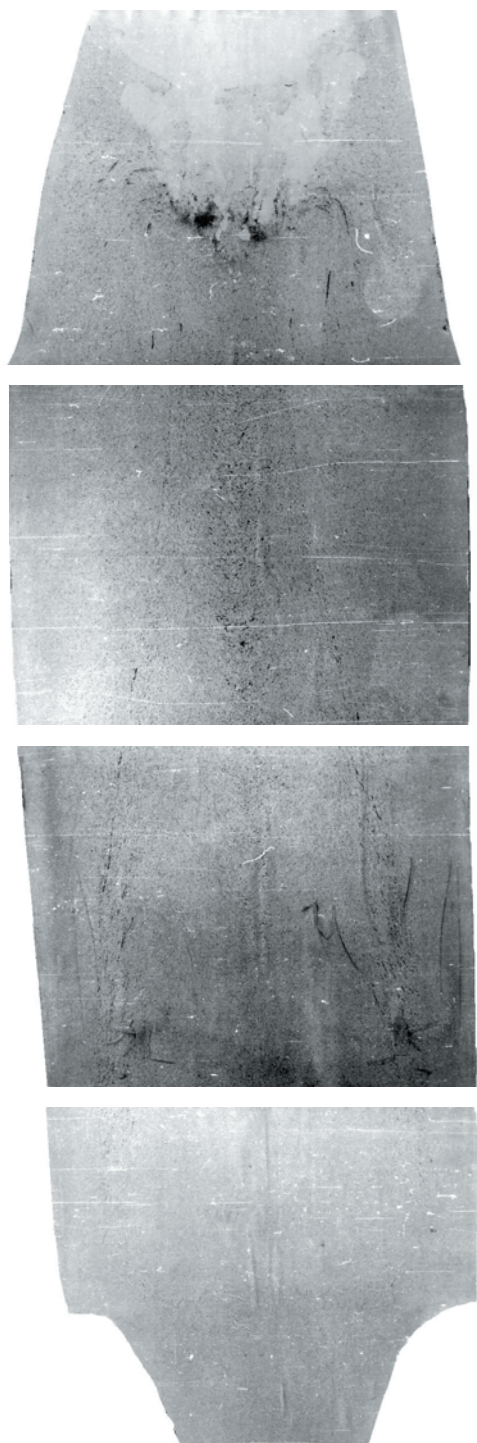
Для слитка с углеродным раскислением металла в вакууме характерно то, что в нем практически не было «шнуров» внецентральной ликвации. На серных отпечатках с продольного и поперечного темплетов, вырезанных



**Рис. 2.** Фото серного отпечатка продольного темплета 13,3-тонного опытного кузнечного слитка стали 25Х2НМФА с пониженным содержанием кремния (0,025 %)

из верха, середины и низа тела слитка, обнаружили только зону сгустков серы, которая присуща и обычным слиткам.

Следует подчеркнуть, что образование «шнуров» внецентричной (Λ-образной) ликвации требует определенного времени, поэтому они могут образоваться только в таких частях слитка, где затвердевание происходит за определенный промежуток времени. При большой скорости затвердевания, как это наблюдается в поверхностных зонах слитка и в ряде случаев в поясе столбчатых кристаллов, эти ликваты не могут образоваться. В центральной части слитка, отличающейся малой скоростью затвердевания, эти сегрегации также



**Рис. 3.** Фото серного отпечатка продольного темплета 13,3-тонного сравнительного кузнечного слитка стали 25Х2НМФА, содержащего 0,34 % кремния

не образуются, так как обогащенный расплав может перемещаться в прибыльную часть без оставления следов, потому что здесь еще не образовалась дендритная клетка, которая препятствует восходящему течению. Достижение минимальной сегрегации обуславливается, прежде всего, низким содержанием серы, фосфора и других вредных примесей, а также снижением содержания кремния до технологически возможных пределов.

Известно отрицательное влияние примесей цветных металлов на служебные и технологические свойства стали [13]. В процессе кристаллизации слитков имеет место значительная ликвация олова, свинца, висмута и сурьмы. Так, через 2,5-4,0 ч после наполнения изложницы содержание их в центральных зонах слитка может превосходить исходные в 1,3-2,7 раза.

С увеличением содержания никеля в стали концентрация примесей свинца и олова возрастает. Это может быть обусловлено наличием примесей в самом никеле и тем, что степень усвоения свинца и олова, вносимых шихтовыми материалами, с увеличением содержания никеля возрастает.

Уровень содержания удаляющихся при вакуумировании примесей (свинца, висмута) в жидкой части кристаллизующегося слитка существенно ниже, чем в слитке, отлитом на воздухе. В то же время ликвация в первом случае увеличивается в связи с понижением вязкости металла, повышением интенсивности и длительности перемешивания жидкой части кристаллизующегося слитка.

Принято считать, что молибден, также как и никель, почти не ликвирует. Однако, при содержании молибдена в стали 0,6-1,0 % ликвация его значительна. Так, в слитке массой 37,5 т разница между содержанием молибдена вверху и внизу слитка составляет 0,1 % при плавочном содержании его 0,67 %. В поковках из слитка массой 65 т разница в содержании молибдена между верхом и низом поковки достигает 0,19 % при содержании молибдена 0,9-1,0 %. Коэффициент ликвации молибдена в этом случае составляет 20 %.

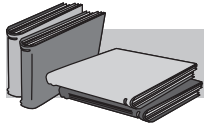
Современная технология выплавки, внепечной обработки и разливки стали позволяет существенно снизить ликвацию вредных примесей в крупном стальном слитке за счет улучшения чистоты разливаемой стали и замены кремния вакуумно-углеродным раскислением. Сложнее обстоит дело с ликвацией углерода и легирующих элементов, содержание которых регламентируется марочным составом стали. Одним из технологических приемов является доливка слитка металлом из нескольких агрегатов с коррекцией химсостава по углероду и легирующим элементам.

Это положение подтверждает отливка 400-тонного слитка японскими специалистами [14]. Этот слиток диаметром 3,6 и высотой 4,0 м был получен из металла, выплавленного в пяти электропечах, обеспечивающих низкое содержание вредных примесей и уменьшение содержания углерода в стали до необходимого уровня в конце разливки. После внепечной обработки металл разливали в вакуумной камере. Контрольные пробы показали высокую чистоту металла по вредным примесям и достаточно стабильный состав по диаметру и высоте слитка.

## Вывод

Таким образом, обеспечивая низкое содержание серы, фосфора и цветных металлов (менее 0,01 % их

общей концентрации), а также кремния (< 0,05 %), применяя вакуумно-углеродное раскисление и доливку слитков, можно отливать крупные слитки улучшенного качества, имеющие высокую физическую и химическую однородность.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов В. А. Разливка и кристаллизация стали – М.: Металлургия, 1976. – 552 с.
2. Скобло С. Я., Казачков Е. А. Слитки для крупных поковок – М.: Металлургия, 1973. – 248 с.
3. Жульев С. И., Фоменко А. П., Титов К. Е. и др. Слитки для крупных поковок // Сталь. – 2005. – № 11. – С. 41-44.
4. Баранова В. Н., Скок Ю. А., Ефимов В. А., Лубенец Г. А. Исследование структуры кузнечного слитка массой 142 т // Процессы литья. – 1995. – № 2. – С. 28-38.
5. Flemings M. C. Principles of Controls of Soundness and Homogeneity of Large Ingots // Scand. J Metallurgy. – № 5. – 1976. – P. 1-15.
6. Терзьян П. Г., Лихач А. А., Кравченко В. М. и др. Влияние редкоземельных элементов на строение слитка низколегированной стали // Разливка стали в слитки и их качество. – № 2. – М.: Металлургия, 1973. – С. 66-69.
7. Оффенгенден А. М. Увеличение выхода годного из слитка спокойной стали // Пути улучшения качества слитка. Материалы совещания. – Ч. 2. – М.: Черметинформация, 1965. – С. 95-99.
8. Соколов В. Е., Микульчик А. В., Гринь В. Е. Исследование 28,5-тонного слитка, отлитого с углеродным раскислением в вакууме // Усовершенствование процессов разливки стали: Труды 8 научно-техн. конф. – М.: Металлургия, 1981. – С. 74-75.
9. Влияние химического состава стали на качество металла крупных слитков / В. С. Дуб, Е. Ф. Зорькин, Э. Ю. Колпишон, Н. А. Хлямов // Формирование стального слитка: Сб. науч. тр. – М.: Металлургия, 1986. – С. 48-50.
10. Некоторые итоги исследований, связанных с освоением производства крупных и сверхкрупных слитков / В. Е. Ключарев, В. С. Дуб, Ю. В. Соболев и др. // Процессы разливки стали и качество слитка: Сб. науч. тр.- К.: ИПЛ АН УССР, 1989. – С. 12-16.
11. Соболев Ю. В., Дуб В. С., Ключарев В. Е. и др. Отливка кузнечных слитков массой 360-420 т на ПО "Ижорский завод" // Процессы разливки, модифицирования и кристаллизации стали и сплавов: Сб. науч. тр. – Ч. 2. – Волгоград, 1990. – С. 95-97.
12. Уразилъдеев А. Х., Буковнев В. В., Агеев П. Я. и др. Ликвация примесей цветных металлов в процессе кристаллизации стальных слитков // Проблемы стального слитка: Труды 6-й конф. – М.: Металлургия, 1976. – С. 142-145.
13. Morikawa H., Nakagawa Y., Maeda K. A study of the solidification of heavy carbon steel ingot // Proc. Int. Conf. Sci. and Steel. – Tokyo. – 1971. – P. 343-344.

УДК 621.746.244

С. П. Еронько, С. В. Мечик, С. А. Бедарев (Донецкий национальный технический университет), С. В. Шлемко, С. В. Шостак (ООО «Солотвин»)

# Разработка устройств для дозированной подачи порошкообразных гранулированных материалов в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок

Использование шлакообразующих и утеплительных смесей, вводимых в кристаллизаторы МНЛЗ, как известно, способствует улучшению качества производимой непрерывнолитой заготовки. Эффективность использования таких смесей

в значительной мере зависит от равномерности их подачи на зеркало металла в строгом соответствии с объемным расходом жидкой стали, поступающей в кристаллизатор. Неравномерная присадка порошкообразных смесей во время вытягивания заготовки приводит к ухудшению условий смазки стенок гильзы кристаллизатора, что может стать причинами прорыва металла, подвисания слитка и развития дефектов на его поверхности [1-3].

На большинстве МНЛЗ металлургических предприятий Украины подачу смесей осуществляют вручную в дискретном режиме, визуально контролируя поведение слоя материала на зеркале металла. При таком способе ввода смеси трудно достичь необходимой равномерности

С учетом данных модельных исследований процесса дозированной подачи шлакообразующих и утеплительных смесей в кристаллизаторы разработаны технические решения, направленные на реализацию непрерывной подачи смеси с расходом, строго соответствующим скорости вытягивания заготовки

ее распределения по всему поперечному сечению кристаллизатора, поскольку в данном случае определяющее значение имеет субъективный фактор [4]. Кроме того, на слябовых машинах с шириной заготовки более 1 м ручной способ присадки порошковых материалов сопряжен с интенсификацией труда разливщиков.

Повышение требований к качеству непрерывнолитой заготовки и стремление исключить влияние человеческого фактора на эффективность технологических операций, осуществляемых во время разливки, явились главными предпосылками начала работ по созданию систем механизированной подачи шлакообразующих и утеплительных смесей в кристаллизаторы МНЛЗ [5, 6].

За рубежом ощутимых успехов в этой области