

Современные подходы к обеспечению свойств шлакообразующих смесей, применяемых при высокоскоростной разливке сортовой заготовки

Шлакообразующие смеси (ШОС), подаваемые в кристаллизатор сортовой МНЛЗ при разливке закрытой струей, имеют определенные технологические функции, среди которых важнейшим является высокотемпературная смазка рабочей поверхности кристаллизатора, совершающей возвратно-поступательные движения, и твердой корочки заготовки, движущейся с определенной скоростью. При этом к процессам трения заготовки и кристаллизатора применимы все основные законы гидродинамической теории смазки [433-435].

Особенностью работы ШОС в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ является сравнительно большая частота качания кристаллизатора и высокая скорость вытяжки заготовки (3,5-6,0 м/мин). Такие условия существенно отличаются от условий работы ШОС в кристаллизаторах слябовых и блюмовых МНЛЗ [436, 437]. Основным отличием является необходимость быстрого затекания жидкого шлака в очень малый зазор между поверхностью заготовки и внутренней поверхностью кристаллизатора. Тонкая жидкая шлаковая пленка (толщина примерно 0,1 мм) обеспечивает жидкую смазку поверхностей кристаллизатора и твердой корочки. При этом в силу крайне малой свободной поверхности зеркала металла в кристаллизаторе ШОС для разливки сортовых заготовок должна быстро расплавляться и гомогенизироваться в расплаве.

Формирующийся на поверхности жидкой стали в кристаллизаторе некоторый слой жидкой ШОС является источником поступления жидкого шлака в зазор между слитком и кристаллизатором, в котором шлак играет роль регулятора теплоотвода и жидкой смазки. Очевидно, что при недостаточной глубине ванны жидкого шлака в этом зазоре не будет необходимого количества жидкой смазки и, как следствие, резко возрастает вероятность образования дефектов поверхности и прорывов металла. При слишком большой же глубине ванны шлака появляется опасность образования по периметру кристаллизатора грубого шлакового ранта [356, 438], препятствующего затеканию жидкого шлака в зазор между слитком и кристаллизатором, что может приводить к подвешиванию корочки слитка в кристаллизаторе, а также прорывам. Также при большой глубине ванны жидкого шлака он в больших количествах может проникать в зазор, сильно деформируя корочку слитка и образуя на его поверхности так называемые «лепешки». Принято считать, что глубина жидкой ванны шлака должна несколько превышать длину хода кристаллизатора. Глубина ванны шлака влияет как на количество жидкого шлака, проникающего в зазор между стенкой кристаллизатора и заготовкой, так и на количество переносимых в шлак неметаллических включений.

При стационарных условиях разливки в кристаллизаторе формируется трехслойное покрытие, состоящее из (рисунок 5.30): слоя сыпучего порошкового материала (200-600 °С), слоя спеченного материала (650-1000°С) и слоя жидкого шлака (1050 °С и более).

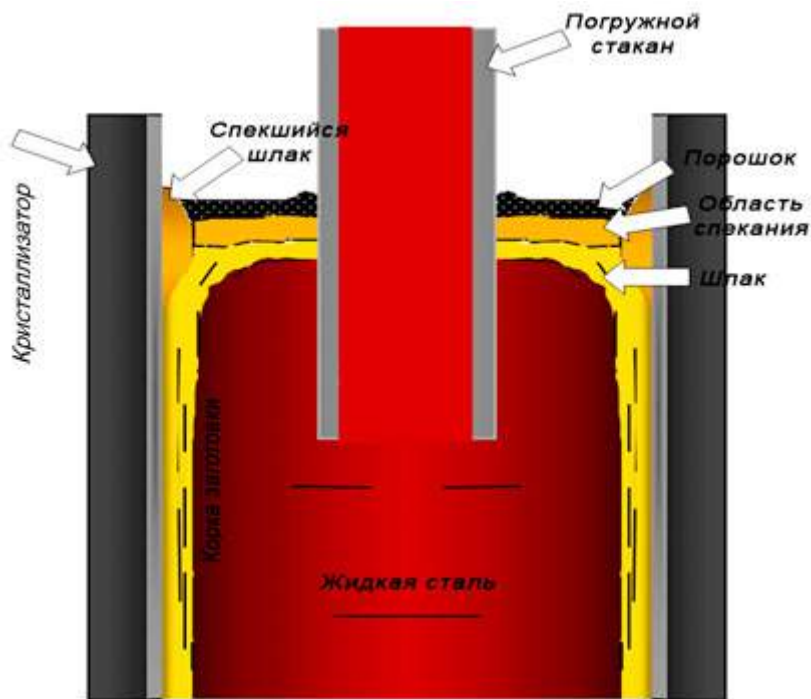


Рисунок 5.30 – Схема плавления ШОС

Плавление ШОС в кристаллизаторе (рисунок 5.31) сопровождается выгоранием углерода при развитии диффузионных и конвективных процессов. На процесс расплавления влияют следующие технологические факторы: скорость и направление потоков расплава в кристаллизаторе; колебания уровня металла в кристаллизаторе; температура расплава; интервалы подачи ШОС в кристаллизатор, гранулометрический состав ШОС и т.п. Скорость плавления ШОС должна соответствовать требованиям, которые предъявляются к расплавленному шлаку (расходу ШОС) в установившемся режиме. Скорости плавления ШОС в кристаллизаторе зависят преимущественно от присутствия частиц свободного углерода. Они не смачиваются в шлаке и предотвращают слипание расплавленных частиц до тех пор, пока углерод не окислится. Скорость плавления ШОС для разливки сортовой заготовки составляет 0,10-0,12 кг/мин.

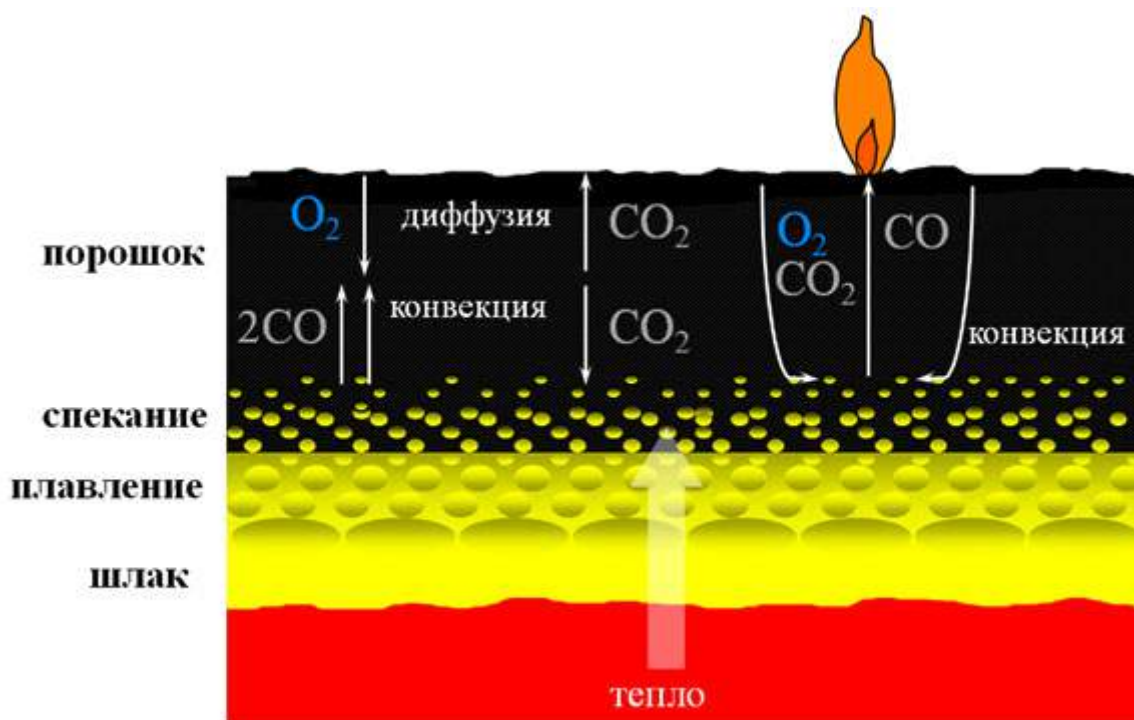


Рисунок 5.31 – Схема расположения ШОС в кристаллизаторе

Анализ известных данных (таблица 5.4) показывает, что существует определенный диапазон химического состава ШОС, который обеспечивает необходимые технологические свойства для разливки сортовых заготовок. Главными компонентами, входящими в состав шлакообразующих смесей, являются: CaO, SiO₂, Al₂O₃, Na₂O и CaF₂. Кислотный оксид SiO₂ образует катион SiO₄²⁻, формирующий силикатную сетку. Такая сетка связывает и удерживает прочие оксиды. Например, Al₂O₃ может заменить катион SiO₄²⁻ в сетке, образуя два отрицательно заряженных иона, AlO₄⁴⁻. Соответственно, это может значительно увеличить вязкость шлака при избытке кислорода.

При затекании жидкой ШОС в зазор между поверхностью заготовки и кристаллизатора образуется тонкая пленка, состоящая из:

- слоя стеклообразной пленки, намерзающей на стенки кристаллизатора;
- слоя кристаллической шлаковой пленки, расположенной на стеклообразной пленке;
- жидкого слоя, прилегающего к поверхности заготовки.

При этом в области зеркала металла у поверхности кристаллизатора из ШОС формируется (намерзает) так называемый шлаковый «носик», который во многом и определяет первичную геометрическую форму твердой корочки в области зеркала.

Важной технологической характеристикой ШОС является ее пористость в твердом состоянии (после затвердевания в зазоре), поскольку она оказывает существенное влияние на теплопроводность пленки шлака, расположенной между поверхностью заготовки и поверхностью кристаллизатора [439, 440]. Исследования пленок шлака, образовавшихся в зазоре между кристаллизатором и заготовкой, позволили установить, что в них расположено большое количество пор в сочетании с капельками стали. Это, видимо, связано с уменьшением количества оксидов железа в шлаке. При этом следует иметь в виду, что шлакообразующая смесь, как правило, содержит определенное количество оксида железа, попадающего с различными минералами.

Таблица 5.4 – Сравнение химического состава и физико-химических свойств ШОС для разливки на высокоскоростных сортах МНЛЗ различных производителей

Показатель	Scorialit SPH-C 189E*	Scorialit SPH-C 189V/10**	Synthesis C13***	Synthesis C17***	Synthesis C18****	Syntherm GB1040/H****	Ac ST 511
Химический состав, %	Mettallurgica		Prosimet			Intocast	S
SiO ₂	32,5-34,5	28,5-30,5	29,0-32,0	31,0-34,0	31,5-33,5	33,8	34
CaO+MgO	21,3-24,1	18,5-20,5	28,5-32,0	24,5-28,0	29,5-32,5	23,8	25
Al ₂ O ₃	4,5-6,0	4,5-6,0	8,0-10,0	7,0-10,0	4,0-5,5	4,7	11
Na ₂ O+K ₂ O	10,0-12,0	9,0-11,0	5,0-7,0	4,0-7,0	4,0-6,0	10,5	3
Fe ₂ O ₃	1,0-2,5	1,0-2,5	1,0-2,0	1,0-2,0	0-1,0	0,9	2
MnO ₂	≤0,1	≤0,2	0	0	0	0,2	
C _{своб}	15,0-17,0	24,0-26,5	12,0-14,0	16,0-19,0	16,5-18,5	16,4	5
C _{сум}	16,6-18,5	26,0-28,0	13,0-15,0	17,0-20,0	17,5-19,5	17,9	
F	4,0-5,5	1,5-3,0	5,0-7,0	3,0-5,0	5,0-7,0	5,4	3
H ₂ O	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	0,4	
Основность CaO/SiO ₂	0,56-0,68	0,59-0,73	0,92-1,02	0,73-0,83	0,89-0,99	0,67	0,5
Точка плавления, °C	1060±20	1080±20	1170±10	1170±10	1140±10	1037	11
Точка разжижения, °C	1120±20	1100±2	1200±10	1200±10	1180±10	1055	11
Вязкость, Пуаз							
1300°C	5,5	9,0	4,4	11,9	3,7	4,0	
1400°C	3,0	4,6	2,3	5,7	2,0	-	
1500°C	1,7	2,6	1,3	2,9	1,2	-	

* - для марок сталей с содержанием углерода C=0,25...0,50%; ** - для марок сталей с содержанием углерода C>0,50%
 *** - для марок сталей с содержанием углерода C=0,10-0,40%; **** - для марок сталей с содержанием углерода C>0,40%

Железо, находящееся в ШОС в виде Fe₂O₃, попадая в кристаллизатор, плавится и вступает в реакцию с углеродом, присутствующим в ШОС в виде порошка, и восстанавливается до FeO. В дальнейшем некоторая часть FeO восстанавливается до железа. Восстановление железа имеет большое влияние на тепловые свойства ШОС по следующим соображениям: увеличение пористости

пленки шлака уменьшает теплопроводность этого слоя шлака; переход ионов железа Fe^{3+} в Fe^{2+} увеличивает поглощающую способность шлака, тем самым снижая излучение тепла через зеркало.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что теплопроводность аморфного шлака составляет примерно 1,2 Вт/м К (при 500 °С). Аналогичную теплопроводность имеют полукристаллические ШОС с высокой пористостью. При отсутствии пористости теплопроводность полукристаллической ШОС увеличивается примерно на 40%.

Следует отметить, что теплоперенос через тонкую аморфную пленку шлака представляется сложным комплексным процессом, поскольку в этом случае необходимо учитывать не только пористость пленки (снижение теплопроводности), но также теплоперенос излучением (и отражение) от поверхности заготовки непосредственно через тонкую пленку. Это во многом зависит от ионов Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cr^{2+} и Cr^{3+} .

Существенную роль в работе шлакообразующей смеси в зазоре между заготовкой и кристаллизатором играет температура начала затвердевания (температура «излома») [441, 442]. Эта температура при заданных условиях разливки «определяет» как глубину затекания жидкого шлака в зазор между слитком и кристаллизатором, так и толщину жидкого слоя ШОС, а, следовательно, условия смазки формирующегося слитка и теплопередачи от слитка к кристаллизатору.

Также весьма важным явлением, сопровождающим проникновение жидкой шлакообразующей смеси в зазор между поверхностью заготовки и поверхностью кристаллизатора, является эффект несмачивания поверхности кристаллизатора каплями ШОС [442, 443]. Фактически жидкий шлак, хорошо смачивающий рабочую поверхность кристаллизатора, будет склонным к прилипанию к ней твердых частичек. Это приводит к налипанию частичек шлака на стенки кристаллизатора в верхней его части. Соответственно, в этом случае будет деформироваться и искажаться поверхность заготовки, а некоторые твердые частицы шлака будут внедряться в тело заготовки. Эффект смачивания шлакообразующей смесью рабочей поверхности стенок кристаллизатора обычно оценивают путем заливки небольшого количества (капли) расплавленного шлака на медные пластины с защитным покрытием (рисунок 5.32).

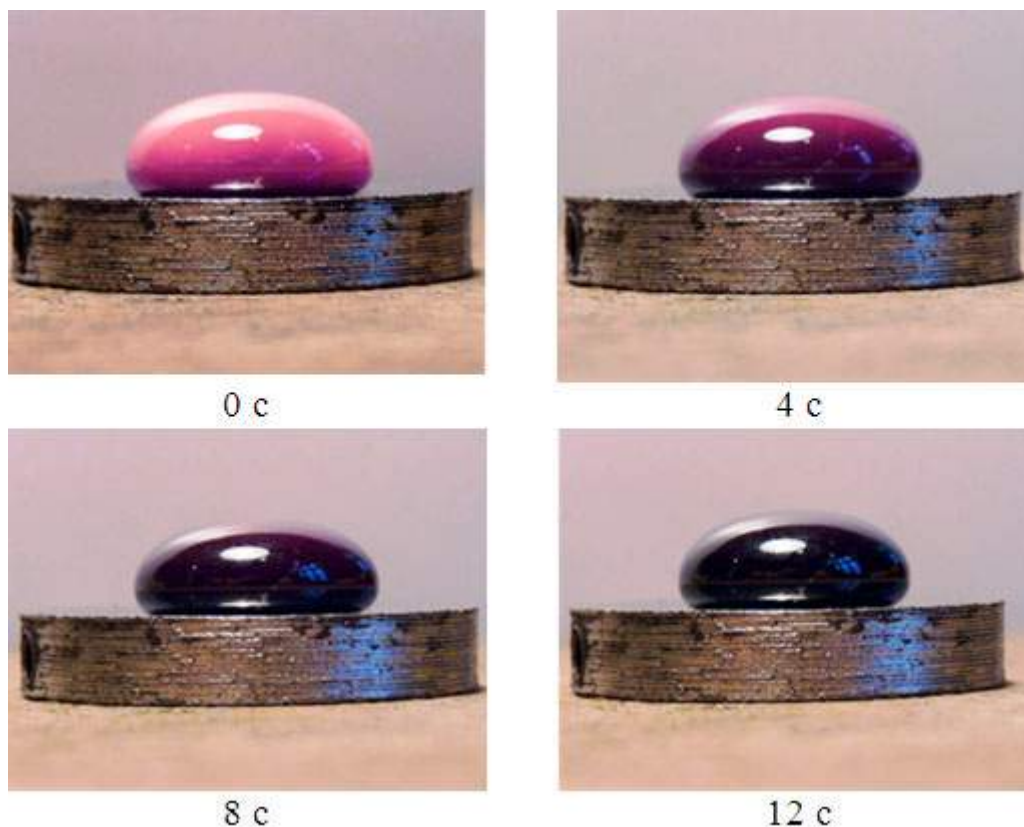


Рисунок 5.32 – Фотографии капли ШОС, затвердевающей на медной подложке с хромовым покрытием

По физическому состоянию ШОС делятся на порошкообразные и гранулированные. Порошкообразные смеси изготавливаются путем простого измельчения исходных компонентов до определенного размера частиц с последующим их смешением. Производство гранулированных ШОС, помимо измельчения и сплавления исходных материалов, включает в себя операцию гранулирования смеси в специальных устройствах – грануляторах.

По сравнению с порошкообразными шлакообразующими смесями гранулированные имеют некоторые технологические преимущества: более однородный химический состав, обеспечивающий гомогенное шлакообразование; лучшую сыпучесть (текучесть) ШОС, что способствует более равномерному распределению гранулята по зеркалу металла в кристаллизаторе; возможность автоматической подачи ШОС в кристаллизатор; меньшую гигроскопичность и пр.

Подача ШОС в кристаллизатор осуществляется либо оператором вручную определенными порциями через некоторые интервалы времени, либо в автоматическом режиме с помощью специальных механизмов или приспособлений. Например, весьма эффективными являются системы автоматической подачи ШОС посредством ее дозирования и транспортировки с помощью шнекового механизма. При этом выталкивание ШОС в кристаллизатор осуществляется порционно специальным толкателем. Такая система предполагает применение как порошкообразной, так и гранулированной ШОС. В любом случае поддержание стабильного точного уровня ШОС в кристаллизаторе является важным фактором с точки зрения обеспечения плавной работы МНЛЗ и хорошего качества поверхности заготовок.

В целом в металлургической практике системы автоматической подачи шлакообразующих смесей будут получать все большее распространение, поскольку они обеспечивают стабилизацию условий литья при условии их совмещения с другими системами автоматизации (например, поддержание уровня контроля металла в кристаллизаторе, предотвращение прорывов и пр.). При этом предпочтение будет отдаваться таким ШОС, которые обеспечат определенную гибкость в процессе разлива в части варьирования скорости литья, стабильность скольжения заготовки относительно кристаллизатора и рациональный режим отвода тепла от твердой корочки заготовки к стенкам кристаллизатора в течение цикла литья.