



The mechanisms of the casting forming which consider the character of hardening of initial shell from the side of the cooling surface of the crystallizer of the system "casting-crystallizer" are specified. It is shown that zones of forming determine the character and the field of hardening of the casting shell, and temporary stages of forming — the consequence of the shell hardening in these zones in time.

Е. Б. ДЕМЧЕНКО, БНТУ, Е. И. МАРУКОВИЧ, ИТМ НАН Беларуси

УДК 621.74.047

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ОТЛИВКИ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ

Формирование отливки при вертикальном непрерывном литье происходит в весьма сложных условиях, характеризующихся образованием начальной корки на мениске расплава, ее дальнейшим затвердеванием в зависимости от теплового состояния системы «расплав—начальная корка—поверхность кристаллизатора—атмосфера», циклическим перемещением корки относительно поверхности кристаллизатора, возникновением газового зазора, интенсивностью теплоотвода в различных зонах кристаллизатора и за его пределами, термоконвективным движением расплава и другими факторами. При нестабильных условиях формирования на поверхности отливки могут возникать различного рода дефекты, снижающие качество непрерывнолитых заготовок и стабильность процесса литья.

О механизмах формирования начальной корки отливки, являющихся основой процесса формирования как при обычных способах литья, так и в кристаллизаторе при непрерывной разливке, высказывались многочисленные соображения. Однако в общем они идентичны и не искажают природы протекающих при этом явлений.

Наиболее близко к реальным условиям вертикального литья механизмы формирования отливки установлены в работах Р.Д.Торнтон [1], Б.Тармана [2], В.А.Ефимова [3].

Р.Д.Торнтон [1] (рис. 1) и Б.Тарман [2] практически одинаково описывают характер механизма формирования начальной корки стального слитка при заполнении изложницы. При подъеме уровня стали на мениске образуется начальная корка оксидов. Высота мениска увеличивается и поэтому корка испытывает все возрастающее давление жидкой стали. В момент времени, когда давление велико, жидкая сталь прорывает корку оксидов в наиболее слабом месте и за-

текает, заворачиваясь, на первоначальную корку. В результате образуются характерные поверхностные дефекты слитка в виде заплывов, размеры и частота возникновения которых определяются тепловыми и скоростными параметрами процесса литья.

Несколько иной механизм формирования начальной корки на мениске стального слитка выявлен В.А.Ефимовым [3] (рис. 2). При наличии смазки на поверхности изложницы давление выделяющихся из смазки газов P стремится удерживать мениск на некотором расстоянии от стенки изложницы. Изогнутый мениск коснется стенки в случае, когда давление жидкой стали внутри слитка на мениск $P_1 = \gamma h_1$ будет равно давлению газов $P_1 = P$. Когда давление стали $P_2 = \gamma h_2$ превысит давление газов P , мениск изогнется к стенке изложницы. Такой периодический изгиб мениска способствует образованию на поверхности слитка углублений. Углубленный участок ab корочки слитка получается довольно слабым, так как отводу тепла и росту корочки препятствует высокое термическое сопротивление газового зазора. Корка

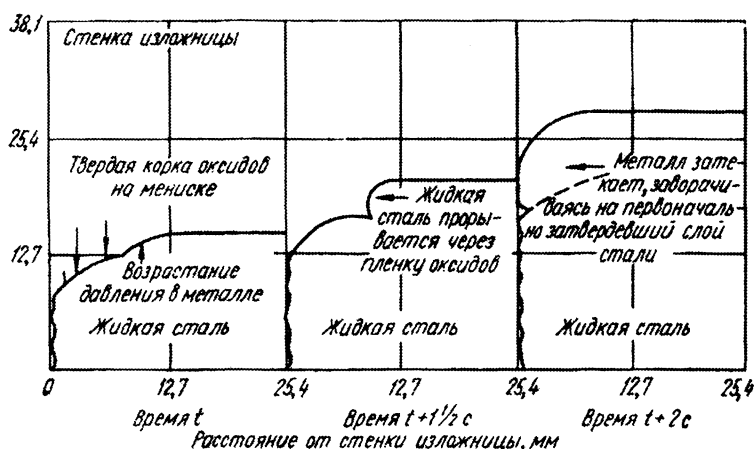


Рис. 1. Формирование начальной корки отливки на мениске по Р.Д.Торнтону [1]

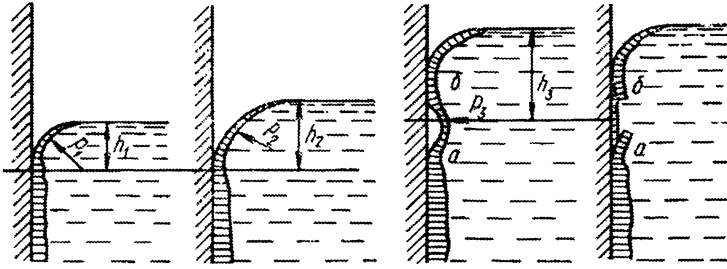


Рис. 2. Формирование начальной корки отливки на мениске по В.А.Ефимову [3]

на участке *ab* ломается и прижимается к стенке изложницы, образуя незначительные заплывы. Частота и размеры углублений зависят от поверхностного натяжения стали, типа смазки, условий охлаждения мениска, температуры и скорости разливки стали. Увеличение интенсивности охлаждения и толщины корки на мениске способствует увеличению частоты образования изгибов корки, а повышение температуры разливки – их уменьшению. Следует отметить, что изгиб корки и образование углублений на поверхности слитка по В.А.Ефимову имеют тот же характер, что и образование заплывов по Р.Д.Торнтону.

Если в предыдущих работах описаны механизмы формирования неподвижной начальной корки отливки при заполнении изложницы сталью, то в работе R.Berthod и G.Lesoult [4] (рис. 3) рассматривается механизм формирования начальной корки при ее движении вниз в течение цикла вытяжки отливки при непрерывном литье чугуна. Движение корки на величину шага вытяжки вниз (рис. 3, *a*) приводит к такому же неравновесному состоянию мениска расплава (см. рис. 1), при котором давление расплава стремится прижать его к поверхности кристаллизатора, а силы поверхностного натяжения, наоборот, препятствуют этому (рис. 3, *б*). Уровень расплава относительно мениска повышается (рис. 3, *в*) и расплав переливается через хвостовик корки (рис. 3, *г*). Хвостовик оплавливается и на поверхности отливки образуются незначительные заплывы расплава (рис. 3, *д*), имеющие такую же природу, как и в ранее рассмотренных случаях.

Исходя из анализа рассмотренных механизмов формирования, можно сделать некоторые выводы, которые будут учтены при теоретическом и экс-

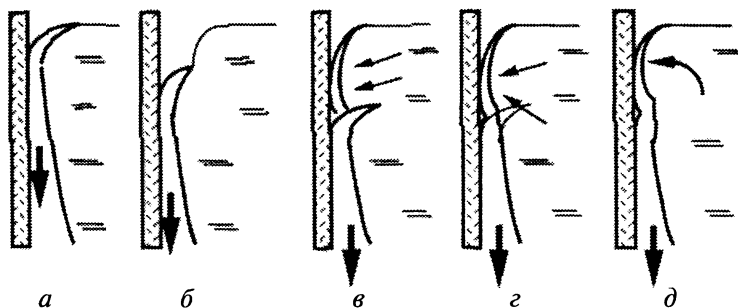


Рис. 3. Формирование начальной корки отливки на мениске по R.Berthod и G.Lesoult [4]

периментальном исследовании процессов формирования отливки при непрерывном литье.

Во-первых, исследования процесса формирования отливки ограничиваются выявлением только механизмов формирования начальной корки на мениске расплава, которые в свою очередь рассматриваются упрощенно. Хотя этап формирования начальной корки на мениске расплава является определяющим в процессе формирования отливки, нельзя счита-

ть, что мениск – единственная зона затвердевания корки отливки или зона, где это затвердевание заканчивается.

Во-вторых, расположение зон формирования отливки, выявляющих характер затвердевания корки, определяется фактором роста корки со стороны фронта кристаллизации системы «расплав–корка».

Здесь следует отметить, что одним из первых исследователей, использовавших понятие зоны затвердевания непрерывной отливки был А.И.Вейник [5]. Он определил четыре зоны затвердевания (рис. 4): *I* – зона заливки или течения расплава, где происходит заполнение кристаллизатора; *II* – зона отвода теплоты перегрева расплава как через стенку кристаллизатора, так и в окружающую среду; *III* – зона затвердевания расплава; корка *III'* находится со стороны поверхности охлаждения, а внутри располагается расплав *III''*; *IV* – зона охлаждения затвердевшей отливки.

Совершенно справедливо полагая, что при непрерывном литье отдельные зоны формирования отливки одновременно располагаются в непосредственной близости одна от другой, а в результате происходит заметное взаимное влияние процессов, протекающих в этих зонах, представленная картина процесса формирования отливки выглядит не очень убедительно. Непонятна роль зоны *I* течения расплава в процессе формирования отливки. Течение

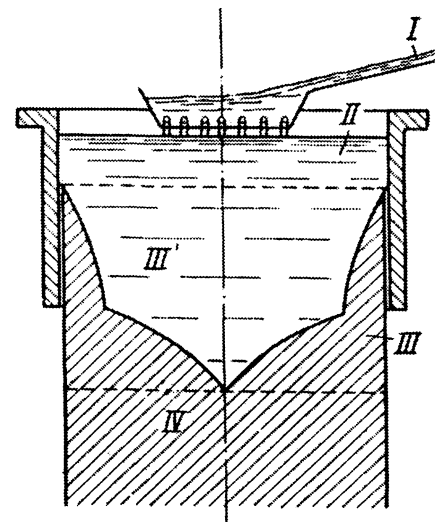


Рис. 4. Схема процесса формирования непрерывной отливки по А.И.Вейнику [5]

расплава, безусловно, является фактором, определяющим характер процесса формирования отливки, но никак не стадий процесса формирования. Отвод теплоты перегрева начинается сразу же после заливки первых порций расплава в кристаллизатор и протекает вдоль фронта кристаллизации в течение всего времени формирования отливки. А поскольку процесс формирования отливки начинается с затвердевания начальной корки на мениске расплава, то и в зоне II отвода теплоты перегрева будет образовываться твердая корка.

Поэтому гораздо точнее определять характер затвердевания корки отливки со стороны охлаждающей поверхности кристаллизатора системы «отливка–кристаллизатор». Именно охлаждающая поверхность кристаллизатора создает условия для формирования отливки, регулирует процесс затвердевания корки в системе «расплав–корка» и именно здесь происходит образование практически всех дефектов поверхности и прорывов расплава.

В-третьих, при исследовании процессов формирования отливки не достаточно определенно рассматривается поэтапный анализ кинетики затвердевания корки отливки во времени, тем более, что процесс вытяжки отливки при вертикальном непрерывном литье, как правило, имеет циклический характер. В этом случае необходимо четко представлять, что зоны формирования определяют характер и область затвердевания корки отливки, а этапы (стадии) формирования – последовательность затвердевания корки отливки в этих зонах во времени.

Условия формирования отливки при вертикальном литье в металлические кристаллизаторы характеризуются следующими обязательными, протекающими одновременно, взаимно противоположными внешними факторами, определяющими стабильность и качество получаемых заготовок. Это наличие струи непрерывно подаваемого в кристаллизатор расплава, что обуславливает возникновение мощных вынужденных термоконвективных потоков, тормозящих процесс кристаллизации начальной корки, а также циклической вытяжки отливки, при которой период движения отливки $t_{дв}$ в направлении вытяжки чередуется с периодом ее остановки $t_{ост}$ относительно кристаллизатора, что, напротив, способствует ускорению процесса формирования начальной корки. Исходя из этих обстоятельств, теоретически можно выделить шесть четко разграниченных временных этапов (стадий) формирования отливки в процессе кристаллизации:

1) формирование начальной корки отливки на мениске расплава в условиях лучистого и конвективного теплообмена с окружающей средой в течение всего процесса литья;

2) формирование корки отливки в условиях интенсивного контактного теплообмена расплава

с поверхностью кристаллизатора по мере его заполнения в период остановки $t_{ост}$ в начале процесса литья;

3) формирование корки отливки в условиях лучистого и конвективного теплообмена малой интенсивности через неизбежно возникающий газовый зазор между коркой, образовавшейся на втором этапе и поверхностью кристаллизатора в период ее движения $t_{дв}$ вниз в процессе вытяжки;

4) формирование вновь образующейся корки отливки в условиях интенсивного контактного теплообмена расплава с поверхностью кристаллизатора при доливке в период остановки $t_{ост}$;

5) рост сформированной на предыдущих этапах корки отливки, протекающий в условиях нестационарного теплообмена с поверхностью кристаллизатора, обусловленного изменением величины газового зазора по высоте в период остановки $t_{ост}$;

6) формирование части корки отливки в условиях лучистого и конвективного теплообмена малой интенсивности с окружающей средой за пределами кристаллизатора.

На первом этапе, на мениске расплава, происходит формирование начальной корки отливки, от размера и прочности которой зависит ее способность выдерживать металлостатическое давление, обуславливающее образование поверхностных дефектов. Длительность этапа соответствует времени заполнения кристаллизатора расплавом до определенного уровня и зависит от параметров процесса литья.

Течение второго этапа формирования корки отливки, протекающего в начале процесса литья, характеризуется спокойным заполнением расплава полости кристаллизатора. При постоянной скорости истечения расплава из литниковой системы и подъеме уровня образующаяся на мениске корка отгибается в сторону кристаллизатора и в дальнейшем кристаллизуется практически без образования серьезных поверхностных дефектов.

Третий этап характеризуется низкой интенсивностью теплообмена через возникающий газовый зазор между отливкой и поверхностью кристаллизатора во время ее движения. Несмотря на то что длительность этапа во времени незначительна и равна времени движения отливки $t_{дв}$, этап важен с точки зрения стабильности процесса литья. На стыке конца второго и начала третьего этапов корка на выходе из кристаллизатора разогревается и ее прочность снижается, что является причиной частых прорывов расплава.

На четвертом этапе, протекающем в условиях интенсивного контактного теплообмена, происходит формирование новой начальной корки отливки как на мениске расплава, так и со стороны рабочей поверхности кристаллизатора при его заполнении во время остановки $t_{ост}$ процесса литья. Вновь образующаяся корка сваривается с

коркой, сформировавшейся на предыдущих этапах. В зависимости от условий формирования корки место сварки во многом будет определять качество наружной поверхности отливки.

В течение пятого этапа продолжается рост твердой корки отливки, образовавшейся на третьем и четвертом этапах. Условия роста корки в пределах кристаллизатора весьма изменчивы и непредсказуемы. С одной стороны, усадка отливки способствует увеличению зазора между коркой и кристаллизатором, а с другой — металлостатическое давление расплава стремится прижать корку к поверхности кристаллизатора. Интенсивность охлаждения корки по высоте и периметру кристаллизатора периодически меняется, что приводит к возникновению разнотолщинности и термических напряжений в корке и последующему, возможно, образованию горячих трещин. На рост корки отливки понижающий эффект оказывают термоконвективные потоки расплава.

Четвертый и пятый этапы являются основными в процессе формирования отливки. Здесь происходит образование значительной части корки, протекает формирование структуры и свойств, определяется качество поверхности будущей непрерывнолитой заготовки.

Шестой, заключительный этап, протекает в условиях, когда часть корки отливки покидает кристаллизатор и охлаждается за счет излучения и конвекции на воздухе. С точки зрения стабильности процесса это самый ответственный (опасный) этап в процессе формирования отливки. На выходе из кристаллизатора интенсивность охлаждения отливки значительно снижается, корка разогревается за счет горячего расплава жидкой сердцевины и термоконвективных потоков, ее толщина и прочность снижаются, что может привести к прорывам расплава. Этап важен для формирования конечной структуры и свойств отливки, а также создания запаса прочности, необходимого при проектировании узлов вытяжки отливки с целью предотвращения смятия заготовки в тянущих или направляющих валках.

Следует отметить, что при установившемся процессе литья формирование корки отливки в течение четвертого, пятого и шестого этапов протекает одновременно. Длительность этих этапов соответствует времени остановки $t_{ост}$ в цикле вытяжки отливки $t_{ц}$. Поэтому при циклической вытяжке процесс кристаллизации начальной корки отливки можно рассматривать как процесс, протекающий одновременно в четырех зонах:

- зона I формирования начальной корки отливки на мениске расплава;
- зона II постоянного контакта корки отливки с поверхностью кристаллизатора высотой Δh ;

- зона III периодического контакта корки отливки и поверхности кристаллизатора высотой $H - \Delta h$;

- зона IV формирования корки отливки за пределами кристаллизатора.

Такой детальный взгляд на процесс формирования отливки при непрерывном литье позволит более подробно (поэтапно) рассматривать механизмы формирования начальной корки, оценить влияние тепловых и технологических параметров, термоконвективного движения расплава, усадки отливки на характер процесса кристаллизации и определить, какому именно временному этапу (стадии) формирования отливки сопутствуют те или иные поверхностные дефекты, в чем заключаются причины их образования, а также наметить возможные методы их устранения.

Исходя из этих предпосылок, механизм формирования корки отливки при симметричном, относительно центральной оси, одностороннем подводе расплава в полость кристаллизатора схематично можно представить следующим образом (рис. 5, а–д).

На первом и втором этапах, в начале заполнения кристаллизатора расплавом (рис. 5, а, б), формирование начальной корки отливки происходит на мениске и со стороны стенки кристаллизатора. Уровень расплава постепенно поднимается и в конце второго этапа достигает некоторого оптимального значения H (обычно 0,03–0,04 м ниже верхней кромки кристаллизатора). Корка отливки прижимается металлостатическим давлением к поверхности кристаллизатора и остается неподвижной. Газовый зазор $\delta_{газ}$ между ними в этот период практически отсутствует, хотя и идеального контакта также нет. Температура расплава в нижней области кристаллизатора несколько ниже и незначительно отличается от температуры заливки. В этот момент скорость кристаллизации начальной корки отливки максимальна. Однако чем выше расположено рассматриваемое сечение образующейся начальной корки, тем меньше время корка затвердевает в условиях плотного

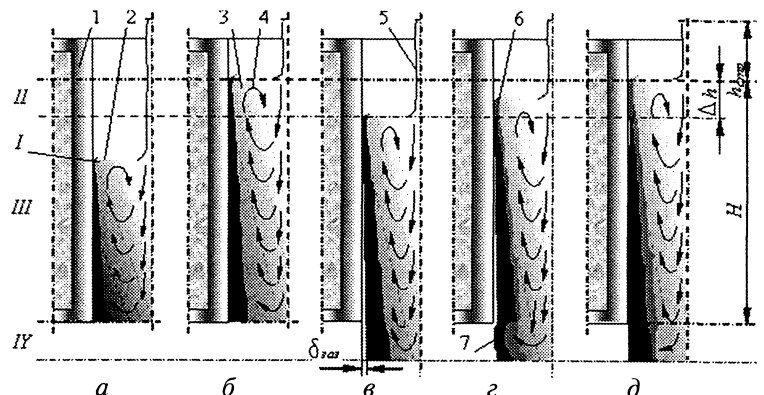


Рис. 5. Механизм формирования начальной корки отливки: 1 — кристаллизатор; 2 — начальная корка; 3 — расплав; 4 — термоконвективные потоки; 5 — струя $h_{стр}$; 6 — вновь образующаяся корка; 7 — оплавление корки

контакта с кристаллизатором. В сечении $H=0$ время формирования корки равно времени, в течение которого отливка неподвижна относительно кристаллизатора, а в сечении $H=H_{\max}$ затвердевание начинается в момент начала движения. Поэтому в момент окончания второго этапа начальная корка имеет разную по высоте кристаллизатора толщину: сечению $H=0$ соответствует наибольшее, а сечению $H=H_{\max}$ наименьшее ее значение.

Третий этап формирования корки (рис. 5, в, г) характеризуется движением отливки на величину шага вытяжки Δh и возникновением газового зазора $\delta_{\text{заз}}$ между коркой и кристаллизатором. Интенсивность охлаждения корки в этот период снижается. Затвердевшая к моменту начала движения корка проходит зону III периодически изменяющегося контакта, увеличивая толщину в условиях теплопередачи через газовый зазор. Несмотря на то что длительность этапа во времени незначительна и равна времени движения отливки $t_{\text{дв}}$ в цикле вытяжки ($t_{\text{дв}}=0,5-2,0$ с), низкий теплоотвод через газовый зазор и влияние термомоноконвективных потоков расплава способствуют повышению до критических значений температуры и оплавлению корки отливки, покидающей кристаллизатор.

На этом этапе момент начала движения корки отливки совпадает с моментом достижения расплава в кристаллизаторе оптимального уровня. Корка отрывается от поверхности кристаллизатора и скользит вниз. Если стабильность процесса литья обеспечивается правильным расчетом и выбором тепловых и технологических параметров, то качество наружной поверхности отливки будет гарантировано (рис. 6). В противном случае (например, температура заливаемого расплава или шаг вытяжки отливки будут меньше расчетных значений) вероятно образование на наружной поверхности отливки характерных дефектов, проявляющихся в виде «морщин» или заплывов (рис. 7).

Заплывы образуются в результате перелива расплава через начальную корку на мениске и затекания в зазор между коркой и поверхностью кристаллизатора под действием металлостатического давления. Глубина и частота заплывов зависят от характера формирования корки отливки на мениске и определяют качество наружной поверхности отливки. Чем меньше глубина заплывов, тем меньше припуск на механическую обработку и выше качество поверхности. При стабильных условиях литья заплывы практически незаметны, а их глубина на поверхности не превышает $(1,0-1,5) \cdot 10^{-3}$ м.

Как правило, заплывы могут образовываться при литье отливок из металлов и сплавов, имеющих низкую теплопроводность и высокую прочность вблизи температур кристаллизации (сталь, чугун). У металлов и сплавов, имеющих противо-

положные теплофизические свойства (медь, алюминий и их сплавы), при подъеме уровня расплава корка на мениске отгибается в сторону кристаллизатора и прижимается к его поверхности. При этом она не теряет связи с ранее затвердевшей коркой и при наличии смазки на рабочей поверхности кристаллизатора легко скользит вниз. В результате отливка имеет ровную гладкую поверхность без дефектов (рис. 8).

В течение третьего этапа, особенно при литье полых отливок, часто возникает ситуация, когда в условиях интенсивного термомоноконвективного дви-

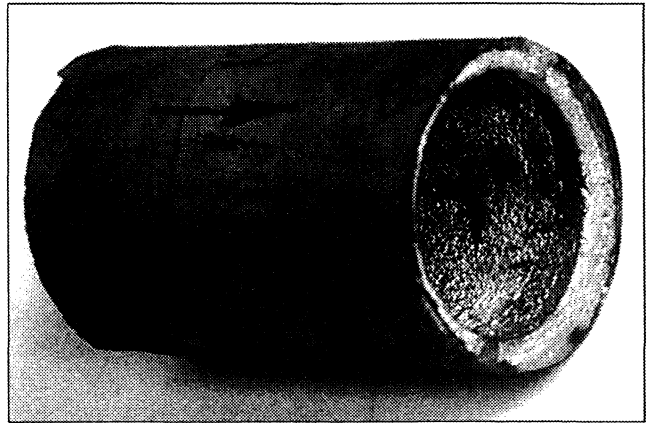


Рис. 6. Чугунная отливка без дефектов поверхности ($d=0,104$ м)

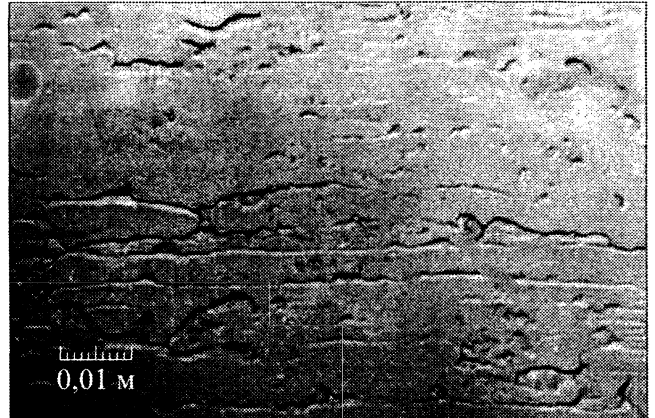


Рис. 7. Следы заплывов на поверхности чугунной отливки ($d=0,104$ м, $w_{\text{cp}}=0,56 \cdot 60^{-1}$ м/с)



Рис. 8. Поверхность полых алюминиевой отливки без дефектов ($d=0,124$ м, $w_{\text{cp}}=0,54 \cdot 60^{-1}$ м/с)

жения расплава весьма тонкая корка оплавляется в месте, расположенном несколько ниже мениска. Во время движения отливки, в условиях трения о поверхность кристаллизатора, часть корки, расположенная выше места оплавления, отделяется от основной корки, что приводит к образованию специфических дефектов поверхности (рис. 9).

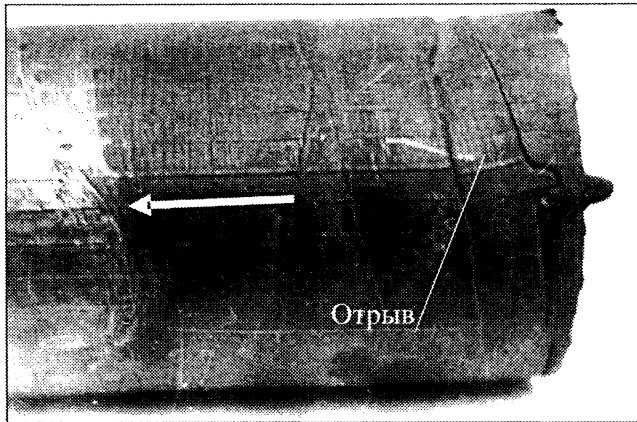


Рис. 9. Отрыв корки чугушной отливки ($d=0,100$ м, $w_{cp} = 0,50 \cdot 60^{-1}$ м/с)

Следует отметить, что отрыв части корки является результатом оплавления основной корки термokonвективными потоками расплава, а не результатом налипания на поверхность втулки, как трактуется многими исследователями [6, 7]. В зоне I мениска степень контакта корки и поверхности втулки определяется величиной металлостатического давления расплава, которое увеличивается по мере удаления от мениска. При этом увеличивается и толщина корки. Поэтому ее нельзя оторвать от основной корки без оплавления. Налипание корки к поверхности кристаллизатора не является главным фактором, безусловно, определяющим образование такого рода дефектов.

Явление отрыва корки, как правило, наблюдается в переходный период, на стыке второго и третьего этапов и может быть значительно ослаблено при снижении температуры заливаемого расплава или изменении способа подвода расплава в кристаллизатор.

Как было отмечено, при установившемся процессе литья формирование корки отливки в течение четвертого, пятого и шестого этапов (см. рис. 5, в–д) протекает одновременно. Четвертый этап формирования корки (см. рис. 5, в, з) повторяет второй этап с той лишь разницей, что при доливке расплава вновь образующаяся в зоне II постоянного контакта корка сваривается с коркой, образовавшейся на первых двух этапах. Малая длительность этапа предопределяет малую толщину и низкую прочность вновь образующейся корки. Поэтому отрыв корки в этот период также вероятен.

Рост толщины затвердевшей корки от поверхности кристаллизатора к центру продолжается в

течение всего времени контакта произвольного сечения отливки с расплавом в течение пятого этапа (см. рис. 5, з). За время остановки $t_{ост}$ газовый зазор между поверхностью кристаллизатора и отливкой, образовавшийся на третьем этапе при движении начальной корки, сохраняется. Контакт отливки с кристаллизатором носит периодический характер (зона III). Величина зазора определяется степенью развития усадки отливки, ее размерами и профилем кристаллизатора. Тепловое расширение кристаллизатора на величину зазора не влияет, так как оно имеет место только в начальный период литья при заполнении кристаллизатора расплавом. В рабочем режиме профиль кристаллизатора остается неизменным.

Наличие и рост газового зазора между отливкой и кристаллизатором создает дополнительное термическое сопротивление теплопередаче от отливки к охлаждаемой среде. Поэтому в зоне III периодически изменяющегося контакта и зоне IV формирования корки отливки на воздухе отливка охлаждается менее интенсивно, чем в зоне постоянного контакта II. Следует отметить, что газовый зазор играет определяющую роль в охлаждении отливки. Регулирование его величины путем задания профиля рабочей поверхности и конструкции кристаллизатора позволяет регулировать скорость затвердевания отливки, что особенно важно при получении отливок из чугуна, весьма чувствительного к условиям охлаждения.

В течение шестого этапа (см. рис. 5, д) в зоне IV за пределами кристаллизатора происходит дальнейшее охлаждение отливки излучением и конвекцией на воздухе. Снижение интенсивности охлаждения на этом участке формирования при постоянстве температуры внутренней поверхности отливки приводит к перераспределению температуры по сечению отливки, наблюдается рост температуры на ее внешней поверхности. Последнее обстоятельство крайне важно для получения чугуных отливок для нужд машиностроения, так как позволяет понизить твердость наружных слоев отливки, затвердевание которых в охлаждаемом кристаллизаторе протекает с большой скоростью. В этих условиях становится возможным даже «самоотжиг» первоначально отбеленных наружных слоев чугуных отливок.

В этот период существенное влияние на механизм формирования отливки и ход процесса литья оказывают металлостатическое давление и термоконвективное движение расплава, воспринимаемые затвердевшей коркой. Если при горизонтальном литье давление одинаково по всей зоне затвердевания, то при вертикальном литье металлостатическое давление нарастает от нулевого значения в зоне I мениска расплава до максимального в конце зоны периодического контакта III. По мере перемещения корки вниз растет ее толщина и одновременно увеличиваются газовый зазор и

металлостатическое давление. Покидающая кристаллизатор отливка, если затвердевание не закончилось и вторичное охлаждение не применяется, попадает в условия малой интенсивности охлаждения, корка разогревается, уменьшается ее прочность. В результате термоконвективные потоки расплава размывают уже разогретую корку, а металлостатическое давление приводит к выпучиванию поверхности отливки (что особенно заметно на плоских поверхностях значительной протяженности), последующему прорыву корки расплавом (рис. 10) и прекращению процесса литья. Установлено, что значительная величина металлостатического давления при увеличении глубины жидкой лунки отливки ограничивает предельные толщины заготовок, отливаемых данным способом.

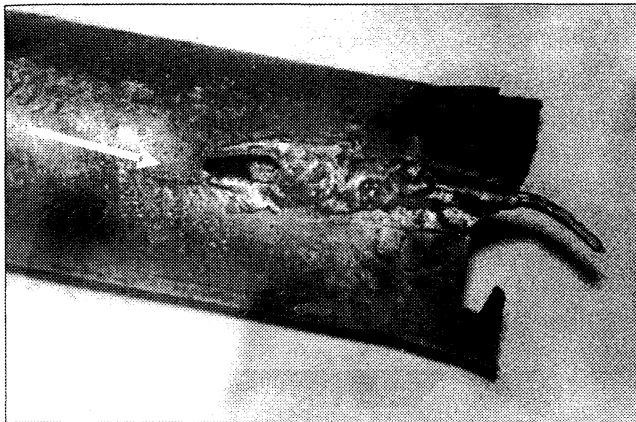


Рис. 10. Прорыв корки чугунной отливки ($d=0,104$ м, $w_{cp}=0,65 \cdot 60^{-1}$ м/с)

Использование стержней в схемах вертикального непрерывного литья для получения полых, мерных и сложного внутреннего профиля заготовок не оказывает существенного влияния на характер течения процесса формирования отливки в кристаллизаторе. Однако приоритет факторов влияния, безусловно, меняется. Так, при получении полых отливок, когда используется односторонний боковой подвод расплава в полость кристаллизатора, первостепенное влияние на процесс формирования отливки оказывают неравномерное распределение теплоты перегрева и термоконвективное движение расплава вдоль фронта кристаллизации. При получении полых мерных отливок фланцы стержней практически полностью устраи-

вают термоконвективное движение расплава, поэтому решающее влияние на формирование отливки в этом случае оказывает теплота перегрева расплава.

Интересен и тот факт, что при литье мерных отливок фланцы стержней накрывают мениск расплава, останавливая процесс формирования начальной корки в этой зоне. Поэтому формирование единичной отливки в момент прекращения ее питания расплавом протекает только в течение третьего–шестого этапов в III–IV зонах. Это значительно упрощает характер процесса кристаллизации и снижает вероятность возникновения приведенных выше поверхностных дефектов.

Таким образом, основываясь на физической природе рассматриваемых явлений, тепловом взаимодействии элементов системы «расплав–отливка–кристаллизатор–охлаждающая среда», уточнены механизмы формирования отливки, рассматривающие характер затвердевания начальной корки со стороны охлаждаемой поверхности кристаллизатора системы «отливка–кристаллизатор». Предложено рассматривать формирование отливки при вертикальном непрерывном литье как процесс, протекающий одновременно в различных зонах поэтапно, во времени. Показано, что зоны формирования определяют характер и область затвердевания корки отливки, а временные этапы (стадии) формирования – последовательность затвердевания корки в этих зонах во времени.

Литература

1. Торнтон Р.Д. Смазки изложниц. М.: Энергия, 1958.
2. Формирование начальной корки на мениске расплавленной стали /Б. Тарман, О. Кляйнхагауэр // Черные металлы. 1961. №2. С. 51–56.
3. Ефимов В.А., Осипов В.П., Гребенюк В.П. Пути усовершенствования разливки стали. М.: Металлургиздат, 1963.
4. Berthod P., Lesoult G. Etude de la formation de la premiere peau en coulee continue horizontale // II Mecanismes de formation des marques. La Revue de Metallurgie-CIT / Science et Genie des Materiaux. 2001. Vol. 97. N 12. P. 1093–1107.
5. Вейник А.И. Теория особых видов литья. М.: Машгиз, 1958.
6. Шатагин О.А., Сладкошteeв В.Т. Горизонтальное непрерывное литье цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1974.
7. Тутов В.И. Разработка малоотходных процессов непрерывного литья заготовок из чугуна для машиностроения: Автореф. дис. ... д-р техн. наук. Мн., 1989.