

М. Р. Бархударов (Flow Science, Inc., США), И.Н.Вольнов (канд. техн. наук, ЗАО «Русская промышленная компания», volnov@cad.ru)

Минимизация захвата воздуха в камере прессования при литье под давлением*

При литье под давлением на машинах с горизонтальной камерой прессования выбору скорости движения прессового поршня уделяют особое внимание. Ошибка с выбором этой скорости становится причиной нежелательного замешивания воздуха в расплав или его избыточного захлаживания. Слишком большая скорость порождает опрокидывание волны на поверхности жидкого металла и приводит к захвату воздуха. Слишком малая скорость вызывает отраженные от противоположного конца камеры прессования волны, которые затрудняют эвакуацию воздуха из камеры. В обоих случаях в отливке наблюдается повышенная газовая пористость.

В статье предлагается упрощенная математическая модель поведения расплава в камере прессования на медленной стадии процесса запрессовки. Модель позволяет с достаточной для инженерных расчетов точностью контролировать поведение расплава и минимизировать риск замешивания воздуха. Адекватность модели установлена путем сопоставления результатов, полученных с ее помощью, с численным моделированием данного процесса в пакете вычислительной гидродинамики **FLOW-3D®** [1] в полной физической формулировке и в 3D постановке.

Математическая модель

Выполним анализ процесса образования и распространения волн на свободной поверхности расплава в горизонтальной камере прессования на простой схеме течения жидкости в открытом канале. Цилиндрическую камеру прессования заменим каналом с прямоугольным поперечным сечением, заполненным в исходном состоянии расплавом на глубину h_0 . Такое упрощение формы справедливо для начальной объемной доли расплава в камере прессования 40–60% [2] и является весьма полезным при решении целого ряда задач. Волны, возникающие и движущиеся вдоль свободной поверхности расплава под действием гравитации g , допустимо описать в приближении модели мелкой воды (длина волны больше глубины канала). Скорость движения такой волны c_0 , согласно данному при-

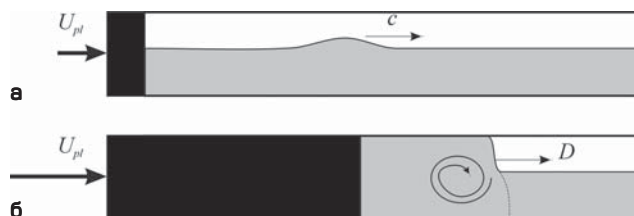


Рис. 1. Схема движения волны на поверхности расплава при медленном перемещении поршня (а) и гидравлический скачок перед поршнем при его быстром перемещении (б)

* Вариант статьи на английском языке опубликован в журнале «Die Casting Engineer», Vol. 53, No. 3, May 2009 (www.diecastingengineer.org).

Предложена упрощенная математическая модель движения расплава в горизонтальной камере прессования машины литья под давлением на медленной стадии запрессовки. Модель позволяет определить скорость движения прессового поршня, при которой минимизируется захват воздуха расплавом. Адекватность модели установлена сравнением с результатами моделирования реального процесса запрессовки в полной физической постановке в пакете программ Flow-3D.

Ключевые слова: литье под давлением, горизонтальная камера прессования, медленная стадия запрессовки, захват воздуха, волна, мелкая вода, скорость движения прессового поршня.

Bakhudarov M.R., Volnov I.N. Minimization of air intake in pressing chamber during die casting

A simplified mathematical model of the melt moving in the horizontal pressing chamber of die casting machine at a slow pressing stage is proposed. The model allows determining the speed of pressing piston, which minimizes air intake by melt. Adequacy of the model is established by its comparing to the results of modeling of the real pressing process in the full physical formulation in software package Flow-3D.

Key words: Die casting, horizontal pressing chamber, slow pressing stage, air intake, wave, shallow water, pressing piston speed.

ближению, задается выражением (рис. 1, а):

$$c_0 = \sqrt{gh_0}. \quad (1)$$

Отметим, что в (1) скорость волны не зависит от свойств жидкости. При малой скорости движения поршня, на медленной фазе прессования, такие волны могут несколько раз пробежать всю камеру прессования, отражаясь от поршня и противоположной ему стенки камеры. При ускорении движения, поршень догоняет ранее созданные волны и переводит поток в сверхкритическое состояние. Расплав перед поршнем заполняет верхнюю часть камеры. Возникают условия течения, называемые гидравлическим скачком. Поток претерпевает скачкообразный переход от ламинарного режима течения в нижней части камеры к турбулентному. На рис. 1, б, схематически показаны две зоны течения в камере прессования, разделенные фронтом гидравлического скачка.

Если пренебречь относительно малой скоростью течения в невозмущенной части расплава перед фронтом гидравлического скачка, то скорость движения этого фронта D может быть определена из соотношения баланса массы:

$$D = \frac{U_{pl}}{1 - \varepsilon}, \quad (2)$$

где U_{pl} – скорость поршня, ε – объемная доля расплава в камере прессования перед фронтом гидравлического скачка [3]. Из (2) следует, что данный фронт будет двигаться всегда быстрее поршня, а также то, что скорость фронта не зависит от свойств металла.

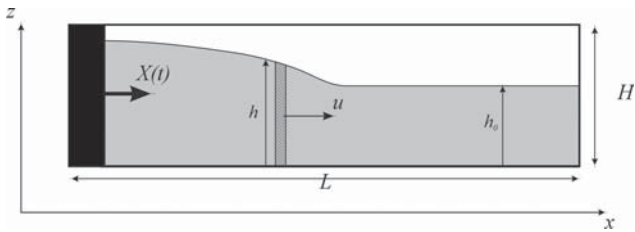


Рис. 2. Схема течения расплава в камере прессования

Уже из уравнений (1) и (2) можно получить некоторые рекомендации для скорости движения поршня на медленной стадии запрессовки. Однако выполним более детальный анализ течения расплава на основе приближения мелкой воды и при замене реальной камеры прессования каналом прямоугольного сечения длиной L и высотой H [4]. В этом приближении предполагается, что вертикальная компонента вектора скорости потока мала по сравнению с горизонтальной компонентой, и ею можно пренебречь. Будем моделировать двумерный поток с вертикальной осью z и горизонтальной x, ориентированной по направлению движения поршня. Если также пренебречь вязкими силами, то поток будет характеризоваться только горизонтальной компонентой вектора скорости u. В этом случае давление в каждой точке расплава будет определяться только гидростатикой:

$$P = P_0 + \rho g(h - z), \quad (3)$$

где $h(x,t)$ – глубина расплава в точке x, в момент времени t (рис. 2).

С этими допущениями определяющие уравнения потока расплава в камере прессования можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(u+2c)}{\partial t} + (u+c) \frac{\partial(u+2c)}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial(u-2c)}{\partial t} + (u-c) \frac{\partial(u-2c)}{\partial x} &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{где } c(x,t) = \sqrt{gh} \quad (5)$$

Скорость движения поршня задается выражением $dX/dt = X'(t)$, где $X(t)$ – положение поршня для времени $t > 0$. На поверхности поршня: $u(X,t) = X'(t)$.

Уравнения (4) описывают волны, отделившиеся от поршня и бегущие вдоль поверхности металла с относительными скоростями $u+c$ и $u-c$. Каждая волна связана с малым фрагментом поверхности и столбцом расплава, расположенным под ним (рис. 2). Положение, скорость и высоту такого фрагмента, отделившегося от поршня в момент времени $t = t_p$, и для времени $t > t_p$ можно определить согласно [4]:

$$\begin{aligned} x(t) &= X(t_p) + \left(c_0 + \frac{3}{2}X'(t_p)\right) \cdot (t - t_p); \\ u(x,t) &= X'(t_p); \\ h(x,t) &= \frac{1}{g} \left(\sqrt{gh_0} + \frac{1}{2}X'(t_p) \right)^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Ускоренное движение поршня

Из (6) следует, что скорость и глубина волн остаются постоянными в процессе движения и зависят только от скорости движения поршня в момент их отделения от него, возрастающая с увеличением последней. Таким образом, первое заключение, которое можно сделать состоит в запрете на замедление поршня, необходимым

для обеспечения подобия угла наклона свободной поверхности металла по всей длине камеры, т.е.:

$$X''(t) \geq 0 \quad (7)$$

Если это условие не удовлетворяется, то будут формироваться волны с гребнями по *обеим* сторонам волн, как это показано на рис. 1, а. Такие волны, достигнув конца камеры прессования, будут от него отражаться и создавать затруднение для эвакуации воздуха в полость пресс-формы.

Управление профилем волн

Постоянная скорость движения волны, отделившейся от поршня, может быть получена из (6):

$$u+c = X'(t_p) + \sqrt{gh} = \sqrt{gh_0} + \frac{3}{2}X'(t_p) \quad (8)$$

При ускоренном движении поршня, каждая следующая, генерируемая поршнем волна приобретает большую по сравнению со всеми предыдущими волнами, скорость движения. Результатом этого является увеличение угла наклона поверхности волн по мере продвижения вглубь камеры прессования. При определенных условиях это может привести к опрокидыванию волны. Исключить такое опрокидывание на медленной стадии запрессовки возможно за счет ограничения угла наклона свободной поверхности. Контролировать же этот угол можно скоростью движения поршня.

Выполним анализ изменения угла наклона поверхности между двумя волнами, сгенерированными поршнем в близкие моменты времени t_1 и t_2 при $t_2 > t_1$ (рис. 3) [5]. Определим угол наклона как:

$$\tan(\alpha) = -\frac{dh}{dx} \approx -\frac{h_1 - h_2}{x_1 - x_2}. \quad (9)$$

Перепишем правую часть (9), подставив в нее x и h из (6):

$$\tan(\alpha) = -\frac{1}{g} \cdot \frac{\left(c_0 + \frac{1}{2}X'(t_1)\right)^2 - \left(c_0 + \frac{1}{2}X'(t_2)\right)^2}{X(t_1) - X(t_2) + \left(c_0 + \frac{3}{2}X'(t_1)\right)(t - t_1) - \left(c_0 + \frac{3}{2}X'(t_2)\right)(t - t_2)}. \quad (10)$$

После линеаризации правой части (10) на интервале $\Delta t = t_2 - t_1$, получаем выражение для угла наклона как функцию времени t и скорости поршня в момент генерации первой волны t_1 :

$$\tan(\alpha) = \frac{1}{g} \cdot \frac{\left(c_0 + \frac{1}{2}X'(t_1)\right) \cdot X'(t_1)}{c_0 + \frac{1}{2}X'(t_1) - \frac{3}{2}X'(t_1) \cdot (t - t_1)}. \quad (11)$$

Отметим, что при движении поршня с постоянной скоростью, т.е. при $X''(t_1) = 0$, правая часть (11) становится равной нулю, а свободная поверхность принимает горизонтальное положение.

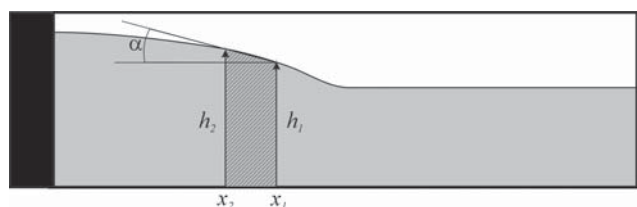


Рис. 3. Схема расчета угла наклона свободной поверхности расплава

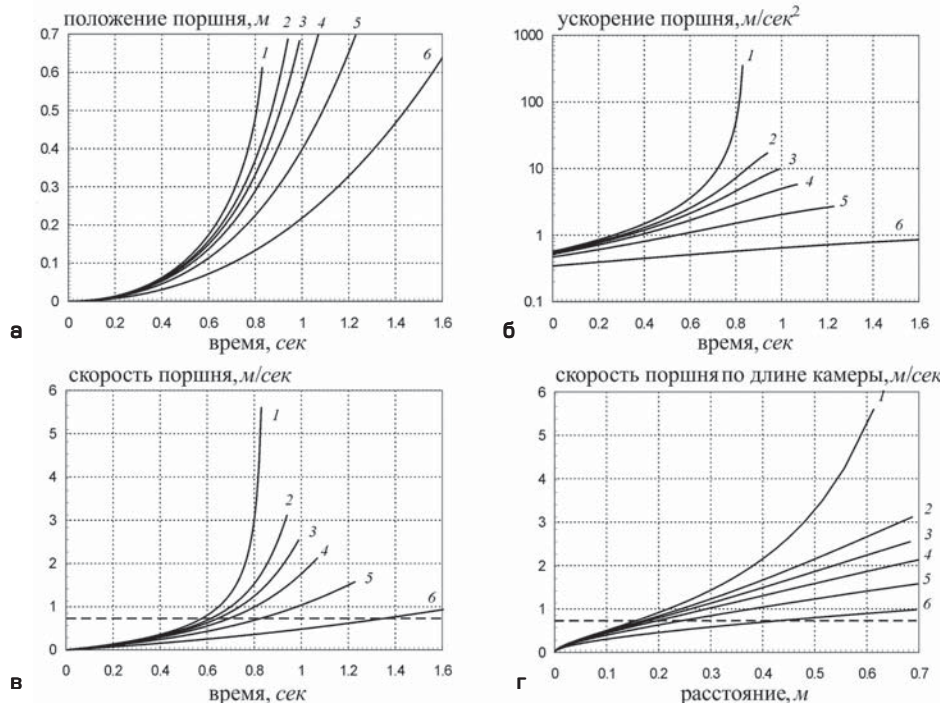


Рис. 4. Решение (13) для положения поршня (**а**), его ускорения (**б**), скорости (**в**) и изменения скорости по длине камеры прессования (**г**) для различных максимальных углов наклона поверхности α_{\max} : **1** – 90°, **2** – 60°, **3** – 45°, **4** – 30°, **5** – 15° и **6** – 5°. Штриховая линия на графиках **в** и **г** – критическая скорость поршня

При ускорении поршня знаменатель правой части (11) уменьшается, а угол наклона со временем увеличивается. Обнуление знаменателя соответствует вертикальному положению поверхности. Максимальное значение α_{\max} угол наклона принимает при достижении волною конца камеры прессования при $t = t_L$. Это время может быть рассчитано исходя из известных: постоянной скорости движения волны и расстояния, которое волна проходит от момента ее генерации на поршне и до конца камеры прессования, при $x = L$:

$$t_L = t_1 + \frac{L - X(t_1)}{c_0 + \frac{3}{2}X'(t_1)} \quad (12)$$

Заменим в уравнении (11) t на t_L и после ряда преобразований получим:

$$X''_{\alpha_{\max}}(t_1) = \frac{\left(c_0 + \frac{1}{2}X'(t_1)\right) \cdot \left(c_0 + \frac{3}{2}X'(t_1)\right) \cdot \tan(\alpha_{\max})}{\frac{1}{g} \cdot \left(c_0 + \frac{1}{2}X'(t_1)\right) \left(c_0 + \frac{3}{2}X'(t_1)\right) + \tan(\alpha_{\max}) \cdot (L - X(t_1))} \quad (13)$$

Уравнение (13) может быть использовано на медленной стадии запрессовки для расчета скорости поршня как функции времени, при которой угол наклона поверхности металла не превысит определенного максимального значения. Так, задавшись значением максимального угла α_{\max} , из (13) можно получить решение для скорости поршня, которое гарантирует, что угол наклона поверхности металла не превысит α_{\max} на всем протяжении камеры прессования и на всем этапе медленной стадии запрессовки. Отметим еще раз, что это ре-

шение зависит только от начального количества металла h_0 в камере и ее длины L и не зависит от свойств металла.

Из (13) также может быть получен минимальный начальный угол наклона α_{\min} поверхности металла, который имеет волна при ее отрыве от поршня в момент $t = t_1$:

$$\tan(\alpha_{\min}) = \frac{X''(t_1)}{g} \quad (14)$$

Как видно из (14) α_{\min} определяется только ускорением поршня и не зависит от его положения и скорости. При продвижении волны в камере угол наклона возрастает до его максимального значения при $x = L$.

Уравнения (7) и (13) определяют интервал значений ускорения поршня в любой заданный момент времени на медленной стадии запрессовки:

$$0 \leq X''(t) \leq X''_{\alpha_{\max}}(t) \quad (15)$$

При движении поршня с ускорением, в заданном (15)

интервале, обеспечивается наиболее благоприятный режим течения расплава, в котором, во-первых, поверхность металла всегда будет обращена от поршня к противоположному концу камеры прессования, способствуя эвакуации воздуха из камеры в литниковую систему, и, во-вторых, угол наклона на всем этапе медленной стадии запрессовки не превысит заданного максимального значения α_{\max} , чем исключается опрокидывание волны и замешивание воздуха.

Результаты

Уравнение (13) является обыкновенным дифференциальным уравнением, которое несложно численно интегрировать и получить $X(t)$ и $X'(t)$. Интегрирование выполняется по t_1 со следующими начальными значениями положения поршня и его скорости в момент времени $t = 0$: $X(0) = 0$ и $X'(0) = 0$.

На рис. 4 приведены результаты численного интегрирования (13) для положения поршня $X(t)$, его скорости $X'(t)$, ускорения $X''(t)$ и изменения скорости по длине камеры прессования $X'(x)$ для нескольких значений α_{\max} . Результаты получены для камеры прессования длиной $L = 0,7$ м, высотой $H = 0,1$ м и начальным содержанием металла 40%, т.е. $h_0 = 0,04$ м.

Как и следовало ожидать, чем меньше α_{\max} , тем медленнее движение поршня. Для наиболее спокойного режима с максимальным углом $\alpha_{\max} = 5^\circ$ поршень достигает конца камеры прессования за 1,66 сек, в то время как для $\alpha_{\max} = 90^\circ$ это время составляет 0,83 сек. Однако на скорость движения поршня может быть наложено дополнительное ограничение по недопустимости превышения некоторой критической скорости, при которой поверхность металла достигает верхней границы камеры прессования $h = H$ [3]. Эта критическая

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48

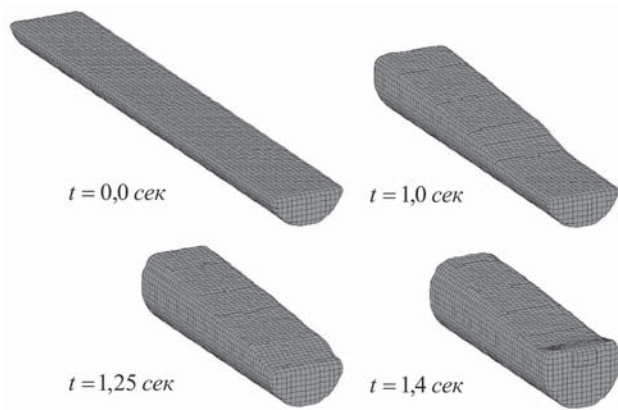


Рис. 5. Последовательные 3D слайды течения металла в камере прессования на медленной стадии запрессовки

скорость показана на рис. 4 (горизонтальная штриховая линия) и может быть получена из уравнения для $h(x,t)$ системы (6) [6]:

$$X'_{кр} = 2(\sqrt{gH} - \sqrt{gh_0}). \quad (16)$$

Для данной камеры прессования $X'_{кр} = 0,73$ м/сек. Даже для $\alpha_{max} = 5^\circ$ скорость поршня достигает критического значения уже при прохождении 60% L, т.е. через $t_{кр} = 1,35$ сек. Для больших углов критическая скорость достигается еще раньше, так для $\alpha_{max} = 90^\circ$, $t_{кр} = 0,58$ сек при прохождении поршнем всего 22% L.

При достижении поршнем критической скорости, а поверхностью металла – верхней границы камеры прессования, допущение мелкой воды для новых условий течения перестает быть справедливым. Можно также утверждать, что в этих новых условиях при продолжающемся ускорении поршня склонность к опрокидыванию волны возрастает, т.к. вся энергия потока перенаправляется теперь вперед не только стенками камеры, но и ее верхней границей. Поэтому на медленном этапе запрессовки обычно рекомендуется ограничивать скорость поршня критическим значением.

Адекватность

Лучший способ проверки адекватности тех или иных упрощенных моделей [5, 7] – это сравнение их с полным трехмерным моделированием процесса запрессовки, включающим все основные физические аспекты этого процесса. Такое моделирование было выполнено для проверки результатов, получаемых на упрощенной модели. Реальный процесс запрессовки моделировали с учетом вязкости расплава и для цилиндрической формы камеры прессования. Теплопереносом и затвердеванием расплава в моделировании пренебрегали, допуская, что оно мало и не оказывает существенного влияния на характер течения.

В моделировании принимали следующие геометрические параметры камеры: длина $L = 0,7$ м (та же, что использована для получения графиков на рис. 4); диаметр $D = 0,1$ м; начальная высота расплава $h_0 = 0,04$ м. Скорость поршня определялась как функция времени для максимального угла наклона поверхности металла $\alpha_{max} = 5^\circ$, заданного уравнением (13) (кривая 6 на рис. 4, с). Результаты моделирования в 3D и 2D видах показаны на рис. 5 и 6, соответственно.

По ряду параметров результаты моделирования хорошо согласуются с аналитическим решением упрощенной модели. Так, угол наклона волны остается близким к 5° . Как это видно из рис. 5 и 6 цилиндрическая форма камеры не оказывает существенного влияния на профиль свободной поверхности в поперечном направлении. Поверхность металла достигает верхней границы камеры прессования в момент времени $t = 1,37$ сек, что очень близко к значению времени $1,35$ сек, получаемому на пересечении кривой 6 с линией критической скорости на рис. 4, с. Скорость поршня в этот момент составляет $0,725$ м/сек, тогда как по (13) она равна $0,73$ м/сек для камеры прямоугольного сечения. Наконец, первая волна достигает конца камеры прессования в момент времени $t = 1,15$ сек, а модель предсказывает значение $1,12$ сек, основываясь на скорости распространения волны в спокойном потоке по формуле (1).

Учитывая трехмерный характер течения и тот факт, что поток является вязким, высокая степень согласования аналитического и численного решений является весьма примечательным. Отметим, что в обоих решениях использована одна и та же начальная высота h_0 расплава в камере прессования. Эта высота $h_0 = 0,04$ м соответствует начальной доле расплава в цилиндрической камере равной 37,4%, тогда как для прямоугольной – она составляет 40%. Если сопоставить результаты двух решений при равной начальной доле расплава в камере, то совпадение не будет таким близким.

Нельзя также говорить о том, что оба решения полностью совпадают и в них нет никаких различий. Изолинии горизонтальной скорости, показанные в плоскости симметрии на рис. 6, указывают на то, что одно из главных допущений аналитического решения, о том, что все переменные потока изменятся только в горизонтальном направлении – не достаточно оправдано. Во-первых, на дне камеры прессования образуется вязкий пограничный слой. Во-вторых, численное моделирование показывает, что поток вблизи свобод-

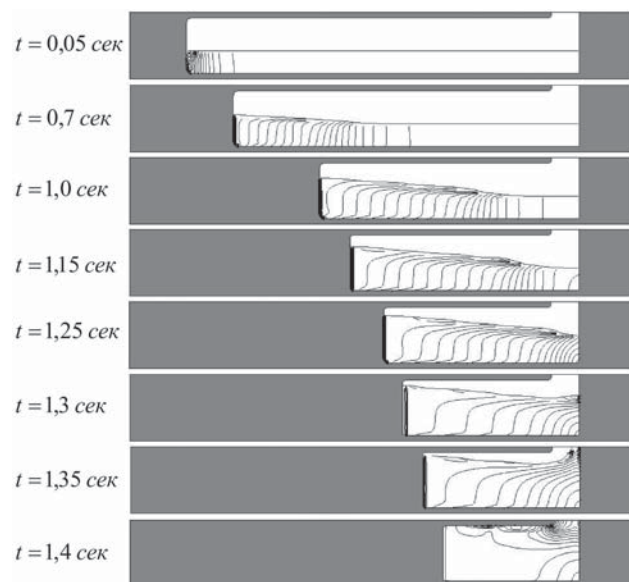


Рис. 6. Последовательные 2D слайды течения металла на медленной стадии запрессовки. Изолинии показывают изменение горизонтальной скорости

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48

ной поверхности движется быстрее, чем в нижележащих слоях расплава, результатом чего может быть возмущение свободной поверхности (всплески). Угол наклона поверхности металла в этом случае может в 1,5–2 раза превысить значение 5° . Такое возмущение достигает конца камеры в момент времени около 1,3 сек и затем отражается назад. В этот момент – на последней стадии процесса – если такая волна не будет направлена в литниковый канал пресс-формы, может произойти замешивание воздуха в расплав.

Заключение

Обычно считается, что опрокидывание поверхности металла, в результате которого происходит захват воздуха, имеет место, когда профиль волны становится вертикальным, что соответствует углу $\alpha_{\max} = 90^\circ$. В действительности нарушение поверхности волны может произойти и при меньших углах наклона, что можно видеть, например, на океанических волнах. Уравнение (13) позволяет произвольно задавать максимально допустимый угол наклона волны и закладывать в него определенный запас для гарантированного исключения замешивания воздуха.

Определенный запас по углу наклона поверхности является важным также в связи со сделанными упрощениями в аналитическом решении, например, заменой цилиндрического канала прямоугольным. Очевидно, что в цилиндрической камере склонность к опрокидыванию волны будет возрастать с повышением уровня металла. Также, критическая скорость в такой камере будет достигаться быстрее, чем в прямоугольной при одинаковых габаритных размерах.

Поэтому некоторый коэффициент запаса может быть даже необходим при определении критической скорости.

Разумеется, что требования к режиму запрессовки, обеспечивающие минимизацию захвата воздуха, должны быть объединены с другими требованиями, определяющими качество изготавливаемой отливки в целом и, в частности, с требованиями обеспечения необходимой скорости заполнения пресс-формы расплавом и минимизации тепловых потерь в камере прессования и литниковой системе.

Список литературы

1. **FLOW-3D®**, Flow Science, Inc., Santa Fe, USA, <http://www.flow3d.com>, 2009.
2. **Lopez J., Faura F., Hernandez J., Gomez P.** On the Critical Plunger Speed and Three-Dimensional Effects in High-Pressure Die Casting Injection Chambers. *Manufacturing Science*. 125, 529 – 537, August 2003.
3. **Garber L.W.** Theoretical Analysis and Experimental Observation of Air Entrapment During Cold Chamber Filling. *Die Casting Engineer*, May/June 1982.
4. **Lopez J., Hernandez J., Faura F., Trapaga G.** Shot Sleeve Wave Dynamics in the Slow Phase of Die Casting Injection. *ASME, Fluid Engineering* 122, 349 – 356, June 2000.
5. **Reikher A., Barkhudarov, M.R.** Casting: An Analytical Approach, Springer-Verlag, London, 2007.
6. **Tszeng T.C., Chu Y.L.** A Study of Wave Formation in Shot Sleeve of a Die Casting Machine. *ASME, Eng.* 116, 175 – 182, May 1994.
7. **Nikroo A.J., Akhlaghi M., Najafabadi, M.A.** Simulation and Analysis of Flow in the Injection Chamber of Die Casting Machine During the Slow Shot Phase. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41, 31–41, 2009.

Внимание! Работа в молодой, активно развивающейся компании!

«Уралхимпласт – Хюттенес Альбертус»
объявляет об открытой вакансии

РЕГИОНАЛЬНЫЙ ПРЕДСТАВИТЕЛЬ - ТЕХНИЧЕСКИЙ КОНСУЛЬТАНТ

Функциональные обязанности:

- Продажа, внедрение и испытание материалов для литейного производства на предприятиях черной и цветной металлургии
- Техническое сопровождение материалов на литейных предприятиях (регулярные командировки с визитами к клиентам)
- Сбор информации, формирование клиентской базы, анализ работы конкурентов, отчетность о состоянии и развитии рынка литейных связующих своего региона.

Требования: высшее образование, опыт работы в литейном производстве, знание процессов ХТС, активность, ответственность, командировки в другие города, высокая работоспособность, рекомендации.

З/п: по результатам собеседования. Высокая. Соц.пакет.

Собеседование состоится после рассмотрения письменного резюме.

Резюме принимаются по e-mail: ucr-ha@ucr.ru (в теме пишите: РЕЗЮМЕ) или по факсу: +7 /3435/ 34 64 00

Для справки: Hüttenes-Albertus, ведущий производитель химической продукции для литейной промышленности и UCP Chemicals, один из крупнейших российских производителей синтетических смол и пластмасс, объявляют о создании совместного предприятия «Уралхимпласт – Хюттенес Альбертус» (UCP-НА) по производству и продаже вспомогательных продуктов для литейной промышленности в России, Украине, Республике Беларусь и всех других странах бывшего СССР.