



УДК 621.74

А.Д. Гиргидов

**ЗАМЕЧАНИЯ О ГИДРАВЛИКЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЛИТЬЯ ТРУБ**

A.D. Girgidov

**REMARKS TO THE HYDRAULIC CENTRIFUGAL CASTING PIPES**

Для оценки формы свободной поверхности расплава при центробежном литье труб в изложнице с горизонтальной осью вращения вводится число Фруда для поля центробежной силы. Показано, что для тонкостенных труб свободная поверхность расплава коаксиальна изложнице. Для толстостенных труб свободная поверхность до начала затвердения либо эксцентрична, либо неустойчива и нестационарна. Вместе с тем по мере процесса затвердевания всегда образуется достаточно тонкий слой незатвердевшего расплава, при котором эксцентриситет свободной поверхности исключается.

ЦЕНТРОБЕЖНОЕ ЛИТЬЕ ТРУБ. ЭКСЦЕНТРИСИТЕТ. ЧИСЛО ФРУДА. ВОЛНЫ МАЛОЙ АМПЛИТУДЫ. КООКСИАЛЬНОСТЬ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ.

The shapes of inner melt free surface while centrifugal tube casting are considered. The Froude number for centrifugal force field is introduced to predict the shapes of the free surface during a solidification. Stable coaxial cylindrical surface of melt for the case of thin wall tube is stated. It is shown that to the end of solidification the inner free surface has no excentricitet anyway.

TUBE CASTING. CENTRIFUGAL FORCE. MELT. FROUDE NUMBER. EXCENTRICITET. SOLIDIFICATION.

Формы с вертикальной осью вращения для центробежного литья труб не используются, так как во избежание разностенности отливок их длина в осевом направлении при реализуемых на практике угловых скоростях вращения  $\Omega = 100$  рад/с не должна превышать диаметр [1, 2]. Поле скорости расплава в случае форм с горизонтальной осью вращения не может быть строго стационарным [3, 4], причем для его приближенного описания нельзя использовать стандартные распределения для осесимметричных течений типа вихря Ренкина [5]. При использовании форм с горизонтальной осью условия изготовления отливки оцениваются коэффициентом гравитации  $K$ , представляющим собой отношение центробежного ускорения к ускорению силы тяжести:

$$K = \frac{\Omega^2 r}{g}, \quad (1)$$

где  $r$  — радиус, который обычно принимают равным радиусу формы  $R$  [1, с. 369], что вполне приемлемо для тонкостенных труб;  $g$  — вертикальная составляющая плотности распределе-

ния силы тяжести. Значения  $K$  на практике изменяются в пределах 75–100 в зависимости от материала формы и интервала затвердевания. Устойчивость внутренней поверхности расплава, как правило, не оценивается, и лишь отмечается [2, с. 278], что вследствие действия силы тяжести «слой расплава в нижней части формы должен быть тоньше, чем в верхней», а также, что по мере затвердевания фронты расплава продвигаются от стенок изложницы к оси вращения, а эксцентриситет его внутренней поверхности уменьшается до нуля к моменту полного затвердевания трубы. Далее в статье делается попытка уточнения некоторых особенностей описанного процесса. Предположим, что при вращении формы расплавленный металл находится в покое относительно стенок изложницы, и запишем интеграл уравнений покоящейся жидкости [6]:

$$p - \rho U = \text{const}, \quad (2)$$

где  $p$  — гидростатическое давление;  $\rho$  — плотность жидкости (расплавленный металл);  $U$  — потенциал внешней массовой силы. Этот потенциал в рассматриваемом случае равен

$$U = U_g + U_{цб}, \quad (3)$$

где  $U_g = -gz$  — потенциал силы тяжести;  $U_{цб} = \Omega^2 \frac{x^2 + z^2}{2}$  — потенциал центробежной силы. Подставив  $U$  в (2), имеем

$$p - \rho \left( -gz + \Omega^2 \frac{x^2 + z^2}{2} \right) = \text{const}. \quad (4)$$

Постоянную интегрирования найдем, полагая, что при отсутствии силы тяжести (или ее пренебрежимо малой величине) свободная поверхность расплава (при  $p = 0$ ) представляет собой коаксиальную цилиндрическую поверхность с радиусом  $r_0$  (см. поз. а рис.).

В результате уравнение свободной (внутренней) поверхности расплава, используя коэффициент гравитации (1), представим в виде

$$x^2 + \left( z - \frac{R}{K} \right)^2 = r_0^2. \quad (5)$$

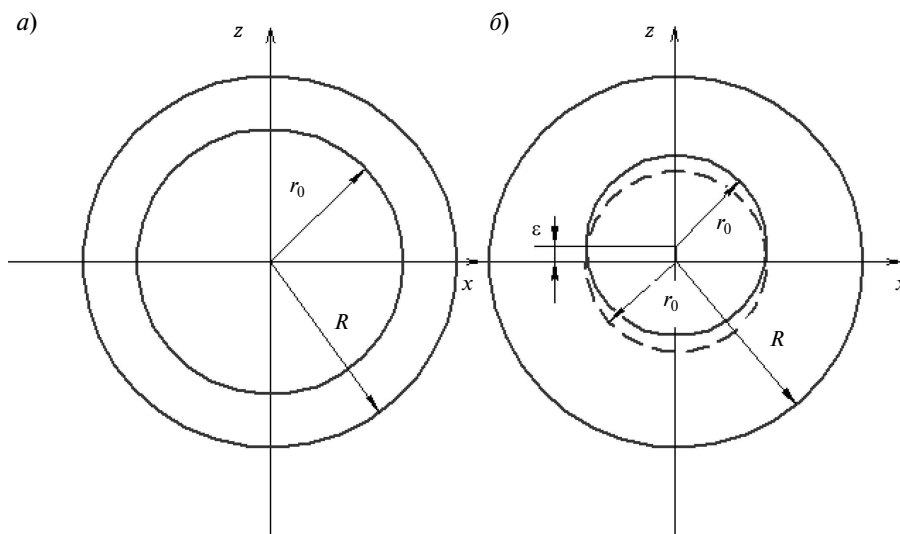
Полученный результат показывает, что свободная поверхность расплава является круглоцилиндрической с радиусом, равным  $r_0$ , и эксцентриситетом  $\varepsilon = \frac{R}{K} = \frac{g}{\Omega^2}$  (см. поз. б рис.). Ось свободной поверхности смещена вверх от оси вращения (а не вниз, как ошибочно указано в [2]). Для принятых на практике значений  $K$  эксцентриситет не зависит от диаметра трубы и изменяется в пределах 1,0–1,5 мм.

Обратим внимание на то, что приведенные выше результаты получены в предположении о возможности относительного покоя в случае цилиндрической оси вращения изложницы. Чтобы оценить эффективность такой гипотезы, представим поле скорости расплава в виде суперпозиции двух полей:

1) стационарного поля вращения в состоянии покоя относительно изложницы (как твердого тела), которое формируется под действием центробежной силы. Свободная поверхность для этой части поля скорости является коаксиальной, цилиндрической и имеет радиус  $r_0$ ;

2) нестационарного поля движения расплава под действием нестационарной (во вращающейся системе координат) силы тяжести. Так как сила тяжести значительно меньше центробежной ( $K \ll 1$ ), то движение будем рассматривать как малое возмущение, наложенное на вращение в состоянии относительного покоя (при отсутствии силы тяжести). Оно проявляется в виде изменения толщины вращающегося слоя жидкости, и его можно рассматривать как поверхностную волну малой амплитуды.

Рассматривая в общем случае нестационарное поле скорости, следует считать, что создаваемое силой тяжести возмущение (волна), будет переноситься вращающимся, как твердое тело, расплавом и вместе с тем перемещаться в противоположном направлении под действием силы



Свободная поверхность расплава во вращающейся изложнице с горизонтальной осью: а) при отсутствии силы тяжести; б) гипотетическая — при наличии силы тяжести в случае толстостенной трубы

тяжести. Чтобы выявить особенности этого процесса, воспользуемся критерием Фруда. Число Фруда представляет собой отношение кинетической энергии потока к потенциальной; в поле силы тяжести оно имеет вид [6]

$$Fr_h = \frac{v^2}{gh}, \quad (6)$$

где  $v$  — средняя по глубине скорость потока;  $h$  — его глубина. В виду того, что плотность распределения центробежной силы  $\Omega^2 r$ , в отличие от силы тяжести, не является постоянной по толщине вращающегося слоя жидкости величиной, число Фруда в этом случае можно определить не единственным образом. В первом варианте, учитывая, что интерес представляют явления на свободной поверхности вращающейся в состоянии относительного покоя жидкости, примем определение числа Фруде в виде

$$Fr_0 = \frac{\Omega^2 r_0^2}{\Omega^2 r_0 (R - r_0)}, \quad (7)$$

где  $\Omega r_0$  — скорость жидкости на свободной поверхности;  $\Omega^2 r_0$  — плотность распределения массовой центробежной силы (аналог  $g$ );  $(R - r_0)$  — толщина вращающегося слоя жидкости (аналог глубины  $h$ ). Как известно [3], корень из числа Фруда

$$\sqrt{Fr_0} = \frac{\Omega r_0}{\sqrt{\Omega^2 r_0 (R - r_0)}} \quad (8)$$

представляет собой отношение скорости потока к скорости перемещения возмущений свободной поверхности (поверхностных волн).

Если число Фруда больше 1, то движение — бурное, и скорость потока больше скорости перемещения волн. При этом возмущения, возникающие под действием силы тяжести, будут сноситься вращающимся слоем жидкости; их встречная скорость недостаточна для формирования стационарной формы поверхности. Для потоков в открытых руслах с горизонтальным дном это явление трактуется в [7] как невозможность существования на свободной поверхности в бурном потоке двумерных стационарных (стоячих) волн малой амплитуды; в бурном потоке могут формироваться только трехмерные (косые) волны.

Из условия  $Fr_0 > 1$  и формулы (7) следует

$$r_0 > \frac{R}{2}, \quad \text{или} \quad R - r_0 < \frac{R}{2}. \quad (9)$$

Таким образом, в случае изготовления тонкостенных труб возмущения, возникающие на свободной поверхности под действием силы тяжести, не могут образовать стационарной эксцентричной цилиндрической поверхности (5), относительный покой также невозможен. Эти возмущения в результате большой скорости их переноса равномерно распределяются по всей свободной поверхности, которая становится практически стационарной (устойчивой) цилиндрической и коаксиальной, что исключает разностенность отливаемых труб (см. рис. *a*). Таким образом, условия изготовления тонкостенных труб в изложницах с горизонтальной осью вращения более благоприятны, чем при отливке в условиях относительного покоя в изложницах с вертикальной осью вращения.

Если труба толстостенная, так что  $Fr_0 < 1$  и  $R - r_0 > \frac{R}{2}$ , то режим вращающегося слоя жидкости будет спокойный, и возмущение свободной поверхности, возникающее под действием силы тяжести, может перемещаться навстречу вращающемуся потоку со скоростью большей, чем скорость самого потока. При этом может сформироваться стационарная стоячая волна [7] и образоваться стационарная эксцентричная цилиндрическая свободная поверхность (5) (см. рис. *б*). Возможно, в некоторых случаях, не определяемых в настоящем анализе, свободная поверхность будет неустойчивой и нестационарной.

Отметим, что при любых числах Фруда, даже если свободная поверхность будет стационарной, поле скорости жидкости как в неподвижной системе координат, так и во вращающейся будет нестационарным.

Аналогичное рассуждение можно провести и при других возможных формулах для числа Фруда. Для максимальных значений скорости жидкости и центробежной силы число Фруда имеет вид

$$Fr_R = \frac{\Omega^2 R^2}{\Omega^2 R (R - r_0)}. \quad (10)$$

Это число Фруда всегда больше 1, и, следовательно, свободная поверхность ни в каких случаях не будет эксцентричной.

Число Фруда со средними по радиальному сечению значениями скорости жидкости и центробежной силы имеет вид

$$Fr_m = \frac{2}{3} \frac{R^3 - r_0^3}{(R^2 - r_0^2)(R - r_0)}. \quad (11)$$

При такой формулировке бурный режим и отсутствие возмущений будут иметь место (из условия  $Fr_m > 1$ ) при

$$r_0 > 0,29R, \text{ или } R - r_0 < 0,71R. \quad (12)$$

Этот критерий является средним между (9) и  $r_0 = 0$ , которое получается при использовании числа Фруда (10).

В любом случае в процессе затвердевания расплава от изложницы к оси вращения толщина расплавленного металла уменьшается, и поток в конце затвердевания согласно всем трем числам Фруда становится бурным, что обеспечит постоянную толщину стенок отливки. Уменьшение эксцентриситета свободной поверхности в про-

цессе затвердевания и его стремление к нулю при окончании этого процесса, а как следствие, отсутствие разностенности у труб, установлены экспериментально и отмечены в [2]. Приведенные выше замечания поясняют гидравлическую сторону этого явления. Стремление к нулю эксцентриситета происходит не непрерывно, а дискретно: в момент, когда толщина расплавленного слоя над затвердевшей частью металла станет настолько малой, то в расплавленном слое возникнет бурное движение.

Если обозначить через  $r_s$  внутренний радиус затвердевшей части отливки, то при  $r_s - r_0 < \frac{r_s}{2}$  режим движения расплавленного, еще не затвердевшего слоя станет бурным, что обеспечит отсутствие эксцентриситета свободной поверхности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные способы литья [Текст]: Справочник / В.А. Ефимов, Г.А. Анисович, В.Н. Бабич [и др.]; под общ. ред. В.А. Ефимова.— Машиностроение, 1991.— 436 с.
2. Гини, Э.И. Технология литейного производства: Специальные виды литья [Текст]: Учебник для студ. высших учеб. заведений / Э.И. Гини, А.М. Зарубин, В.А. Рыбкин; под ред. В.А. Рыбкина.— М.: Изд. центр «Академия», 2005.— 352 с.
3. Балувев, А.И. Взаимосвязь сил, действующих на металл при производстве фасонных отливок центробежным методом. Вопросы судостроения [Текст] / А.И. Балувев, А.Д. Гиргидов, В.П. Голуб // *Металлургия и сварка. Сер.8: Metallurgy.*— Вып. 4 (16).— Л.: Судостроение, 1973.— С. 137–142.
4. Гиргидов, А.Д. О расчете гидродинамического давления в системе охлаждения реактора турбогенератора [Текст] / А.Д. Гиргидов // *Изв. вузов. Энергетика.*— 1987. № 5.— С. 100–105.
5. Гиргидов, А.Д. Диссипация механической энергии в круглоцилиндрической трубе [Текст] / А.Д. Гиргидов // *Инженерно-строительный журнал.*— 2012. № 6.— С. 5–11.
6. Гиргидов, А.Д. Механика жидкости и газа (гидравлика) [Текст] / А.Д. Гиргидов.— СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2007.— 545 с.
7. Гиргидов, А.Д. Косые волны с точки зрения теории волн малой амплитуды [Текст] / А.Д. Гиргидов // *Известия ВНИИГ им. Веденеева.*— Т. 89. 1969.— С. 134–142.

**ГИРГИДОВ Артур Давидович** — доктор технических наук, профессор кафедры гидравлики инженерно-строительного института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия  
(812)552-64-01  
hydraulika@cef.spbstu.ru