

УДК 621.1

**АНАЛИЗ РЕШЕНИЯ СОПРЯЖЕННОЙ ЗАДАЧИ
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ
ТОНКОСТЕННЫХ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК**

Докт. техн. наук, проф. ЕСЬМАН Р. И., канд. техн. наук ШУБ Л. И.

Белорусский национальный технический университет

Исследования процессов течения и теплообмена в жидких движущихся расплавах представляют значительный интерес – как теоретический, заключающийся в математическом описании сложных взаимосвязанных процессов теплопереноса, так и практический, состоящий в создании научных основ новых технологий энергетики, металлургии и машиностроения, использующих эффекты движущихся расплавов. К таким теплотех-

нологиям относятся: непрерывные способы литья, методы жидкой штамповки, центробежные способы литья, методы получения корпусных заготовок под низким давлением и в подвижные кристаллизаторы, методы литья выжиманием, а также использование жидкометаллических теплоносителей в энергетике и других отраслях промышленности.

На примере охлаждения и затвердевания отливки сложной конфигурации исследованы процессы гидродинамики и теплообмена для нестационарного режима, начиная со стадии заполнения полости формы расплавом и заканчивая затвердеванием отливки. Результаты расчетов по разработанному алгоритму [1, 2] представлены в виде распечаток температурных полей, полей скоростей и давлений в различных сечениях струи жидкого металла при его движении в полости формы.

Основные данные для расчета: наружный радиус цилиндрической стенки $R_1 = 0,15$ м; ширина кольцевого канала $R_1 - R_2 = 0,1$ м; длина цилиндрической стенки, отсчитываемая от выступа со стороны поступления жидкого металла: $L_1 = 0,03$ м; длина стенки вниз по потоку от выступа $L - L_2 = 0,07$ м.

Начальная температура металла $T = 923$ К, равномерная по всей полости. Материал отливки – сплав ВАЛ 10. С наружной поверхности кокиля теплообмен осуществляется свободной конвекцией с коэффициентом теплоотдачи $\alpha = 50$ Вт/(м²·К). Средняя скорость движения жидкости в кольцевом канале $u_0 = 0,1$ м/с.

Рассмотрим характер течения в начальный момент времени. Металл имеет постоянную температуру во всей области течения. На рис. 1 представлены профили (1–10) безразмерной продольной скорости u/u_0 в характерных сечениях потока. Профиль скорости, обозначенный цифрой 1, характерен для равномерного течения в трубе кольцевого сечения. Для продольной скорости получено выражение, в котором она представлена как функция отношения радиусов труб, образующих кольцевой зазор ($\theta = R_2/R_1$) и радиуса данной точки потока r . При принятых размерах $\theta = 0,14/0,15 = 0,933$ выражение для безразмерной скорости имеет вид

$$\frac{u}{u_0} = 676,86(1 - r^2 + 1,868 \ln r). \quad (1)$$

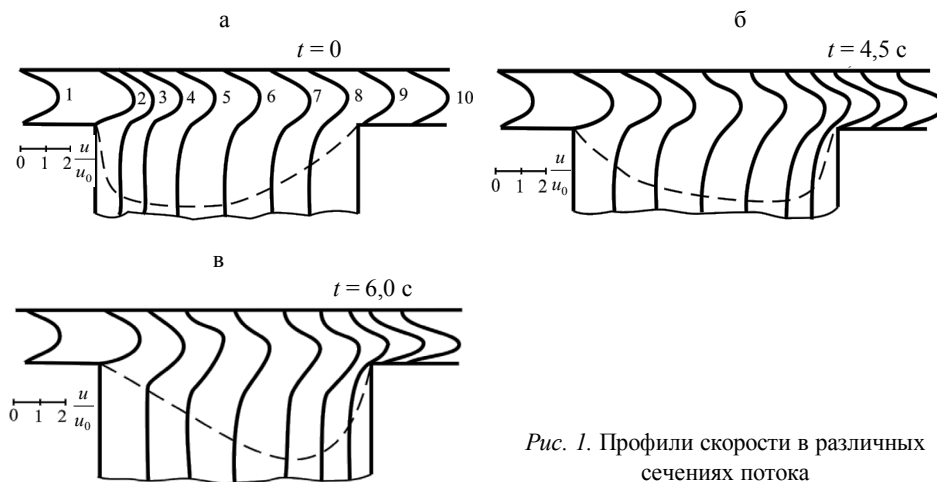


Рис. 1. Профили скорости в различных сечениях потока

Теоретические значения скорости и значения скорости в полости цилиндрической стенки на различных расстояниях от плоскости сопряжения стенки с выступом, полученные в результате численного решения, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Профили скорости в канале сложного сечения

$r_{\text{разм}}, \text{ м}$	r	u/u_0						
		$l_1 = (L_1 - x)/(R_1 - R_2)$			$l_2 = (x - (L_1 + L_2))/(R_1 - R_2)$			
		0	0,275	3,0	0	0,4	1,6	7,0
0,14000	0,923	0	0	0	0	0	0	0
0,14025	0,935	0,241	0,226	0,216	0,303	0,217	0,214	0,219
0,14125	0,941	0,731	0,706	0,685	0,754	0,704	0,680	0,683
0,14250	0,950	1,169	1,155	0,138	1,137	1,125	1,119	1,130
0,14400	0,960	1,468	1,467	1,463	1,417	1,423	1,431	1,449
0,14600	0,973	1,438	1,442	1,448	1,385	1,416	1,433	1,447
0,14750	0,983	1,082	1,096	1,112	1,093	1,126	1,141	1,126
0,14875	0,992	0,631	0,647	0,664	0,693	0,725	0,716	0,677
0,14975	0,998	0,191	0,199	0,208	0,248	0,257	0,231	0,213
0,15000	1,000	0	0	0	0	0	0	0

В табл. 1 l_1 и l_2 – расстояния от переднего и заднего краев выступа, отнесенные к кольцевому зазору $R_1 - R_2$. Как следует из таблицы, профили скорости в кольцевом канале перед выступом и за ним деформируются сравнительно мало и численные значения скорости близки к теоретическим. Расхождение теоретических и численных данных в центральной части потока в сечениях $l_1 = 3$ и $l_2 = 7$ не превышает 3 %. Расхождения в данных, наблюдаемые в непосредственной близости к стенкам, связаны с приближенной аппроксимацией граничного условия $u = 0$ в численной схеме и с округлением величины r , влияние которой при расчете по формуле (1) вблизи точек $r = 0$ и $r = 1$ на значение скорости очень велико.

На расстояниях $l_1 > 0,3$ и $l_2 > 8-10$ профили скорости остаются практически постоянными. Эти цифры определяют длину входного и выходного участков, наличие на которых выступа оказывает влияние на характер течения в кольцевом канале.

Кольцевой поток при выходе за срез кольцевого канала и попадании в пространство выступа срывается, в результате чего расширяется и образуется возвратное течение. На рис. 1 пунктирной линией разделены зоны прямого и возвратного течений. Следует отметить, что интенсивность обратного течения мала. Максимальная отрицательная скорость не превышает по модулю значения 0,05. В выбранном масштабе такие величины мало отличны от нуля, и поэтому на рис. 1 профили скорости возвратного течения не приводятся.

Представление о характере течения в зоне сопряжения выступа с цилиндрической стенкой можно получить из картины линий тока (рис. 2), где цифрами на кривых показаны соответствующие значения функции тока ψ . Нулевая линия тока отделяет зону вихревого циркуляционного течения, замкнутые линии показывают траекторию движения частиц жидкости в зоне циркуляционного течения. Напомним, что разность между значениями функций тока на линиях тока определяет расход жидкости между эти-

ми линиями. Из рис. 2 следует, что интенсивность циркуляционного движения более чем в 10 раз меньше интенсивности основного потока.

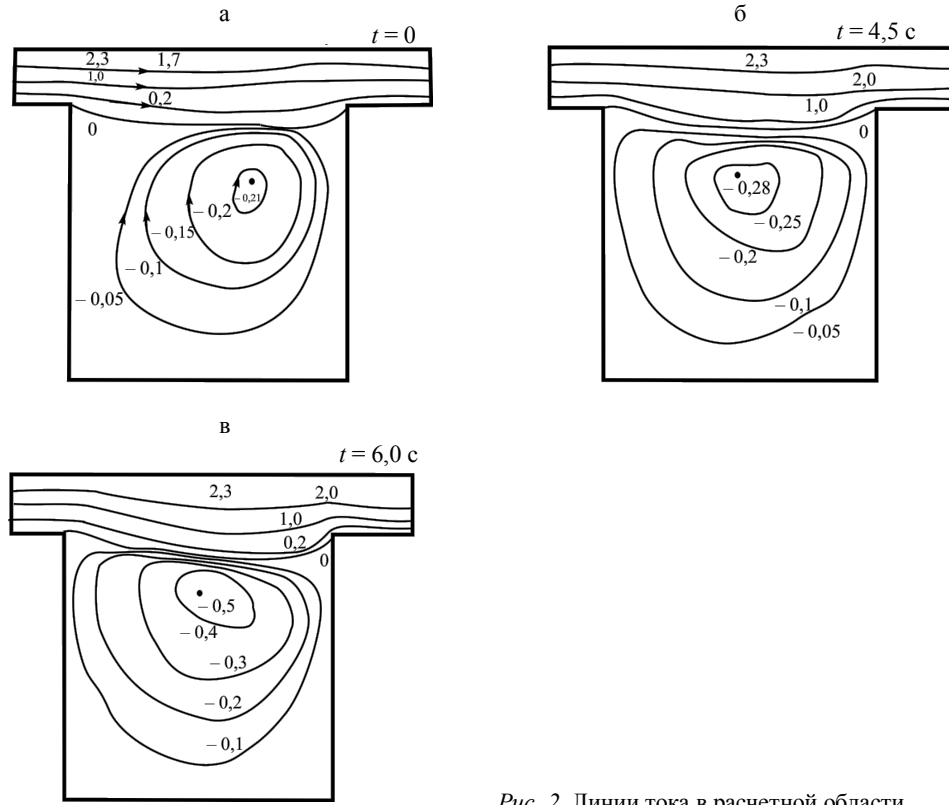


Рис. 2. Линии тока в расчетной области

Рассмотрим характер изменения давления. В кольцевом канале на достаточно большом расстоянии от выступа вверх и вниз по потоку течение является параболическим, давление по сечению канала практически не изменяется. В рассматриваемом течении расчетные значения градиента давления на левой и правой границах расчетной области соответственно равны: $(\partial \bar{p} / \partial x)_{x=L} = -0,624$; $(\partial \bar{p} / \partial x)_{x=0} = -0,606$. Отличие в величинах $\partial \bar{p} / \partial x$ на входе и выходе связано с тем, что выбранные сечения лежат в области не полностью развитого параболического характера течения. В трубах размерный градиент давления связан с коэффициентом гидравлического трения по формуле

$$\left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right)_{\text{разм}} = -\frac{\lambda}{2d_r} \rho u_0^2. \quad (2)$$

Относя давление к ρu_0^2 , расстояние x – к радиусу R_1 и учитывая, что гидравлический диаметр d_r определяется по формуле $d_r = 4(1 - \theta)R_1$, получаем зависимость между λ и безразмерным градиентом давления $\partial \bar{p} / \partial x$ в виде

$$\lambda = -4(1 - \theta) \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right). \quad (3)$$

Поскольку $\theta = 0,933$, находим: $\lambda_{x=1} = 0,1665$ и $\lambda_{x=0} = 0,1616$. Сравним эти значения с теоретическими. Коэффициент гидравлического трения в кольцевой трубе при $\theta > 0,5$ определяется по формуле, в которой число Рейнольдса подсчитывается по ширине кольцевого канала: $Re = \rho u_0 R_1 \cdot 2(1-\theta)/\mu$. При начальной температуре $T_0 = 923$ К коэффициент динамической вязкости $\mu = 9,0 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Вычислим число Рейнольдса. С учетом значения плотности $\rho = 2670$ кг/м³ имеем

$$Re = 2670 \cdot 0,1 \cdot 0,15 \cdot 2(1 - 0,933) / 9 \cdot 10^{-3} = 593.$$

Находим теоретическое значение $\lambda = 96/593 = 0,1619$, которое хорошо согласуется со значениями коэффициентов λ , полученных численным путем.

В некоторой окрестности сопряжения кольцевого канала с выступом линейный характер изменения давления нарушается. Характер изменения давления на этих участках, а также в промежутке, занятом выступом, представлен на рис. 3.

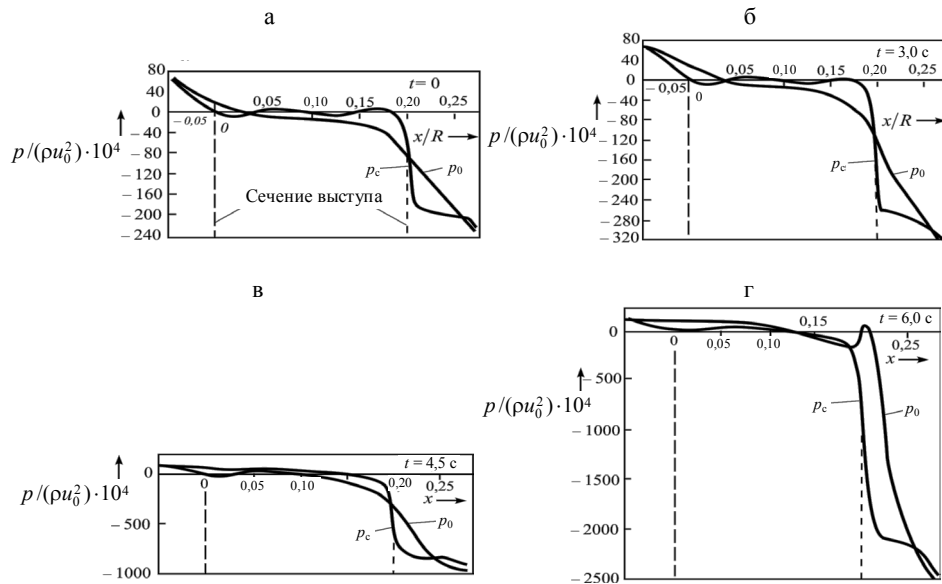


Рис. 3. Распределение давления по длине потока

На некотором расстоянии от выступа вверх по потоку в кольцевой трубе появляется градиент давления по сечению и продольный градиент давления начинает уменьшаться. На промежутке, занятом выступом $0 \leq x/R \leq 0,2$ по наружной поверхности полости падение давления p_0 мало и лишь вблизи входа в кольцевую трубу градиент давления быстро увеличивается и принимает значение, характерное для потока при равномерном течении в кольцевой трубе. Из графика изменения давления p_c на линии $r = R_2$ видно, что по длине выступа $0 \leq x/R \leq 0,2$ давление практически не меняется. Расчеты показывают, что течение в срывной зоне является практически безградиентным. Малые градиенты давления определяют малые значения скорости в зоне возвратного течения, о чем было упомянуто выше. При сужении потока на входе в кольцевой канал на линии $r = R_2$ дав-

ление резко падает. На срезе кольцевого канала при $x = L_1 + L_2$ перепад давлений $p_c - p_0$ меняет знак. На некотором расстоянии от среза градиент давления быстро исчезает, а затем становится таким же, как и на наружной поверхности трубы.

Увеличение скорости и уменьшение площади проходного сечения в кольцевом канале в период охлаждения приводит к существенному и быстрому увеличению падения давления по длине потока и росту гидравлического сопротивления кольцевых каналов и как следствие – к возрастанию давления, необходимого для подачи расплава в полость. Значения безразмерного градиента давления $\partial p / \partial x$ и коэффициента гидравлического трения λ в выходном сечении расчетной области, а также перепад давлений $\Delta p = \frac{p_{x=L} - p_{x=0}}{\rho u_0^2}$ в различные моменты времени приведены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость гидравлических параметров от времени

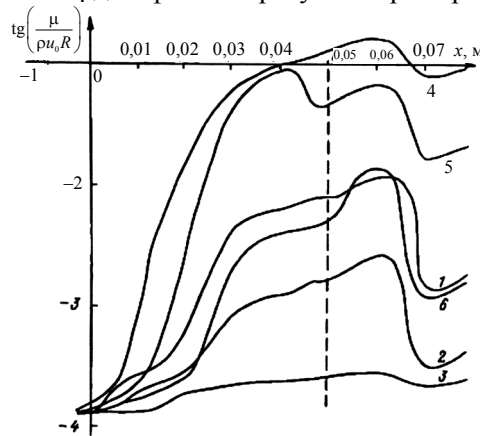
t, c	$\partial p / \partial x$	λ	Δp
0	0,624	0,166	0,0503
3,0	0,792	0,211	0,0657
4,5	1,980	0,528	0,1400
6,0	5,028	1,340	0,3915

Охлаждение металла происходит главным образом за счет теплоотвода в кокиль. Вблизи контактной поверхности с кокилем наблюдаются наибольшие градиенты температур, что видно по сгущению изотерм. Однако по длине потока охлаждение осуществляется неравномерно. Цилиндрическая стенка перед выступом охлаждается наименьшим образом за счет постоянной подачи в полость горячего расплавленного металла. Напомним, что по условиям постановки задачи левая входная граница поддерживается при постоянной температуре $T = T_0 = 923$ К. Наиболее быстро охлаждается жидкий металл в области, примыкающей к сечению сопряжения выступа

с выходной цилиндрической стенкой. Объясняется это тем, что в окрестности входного сечения кольцевого канала при втекании в него жидкости из широкой полости выступа происходит ее поджатие к наружной цилиндрической стенке, о чем свидетельствуют профили скорости на рис. 1 и линии тока на рис. 2. Это в свою очередь приводит к возрастанию локальных коэффициентов теплоотдачи на контактной границе «кокиль – отливка» и как следствие – к более активному охлаждению металла.

Изменение температуры сказывается на изменении вязкости жидкого металла. На рис. 4 приводятся графики изменения безразмерного коэффициента вязкости $\mu / \rho u_0 R$ на различных расстояниях от контактной поверхности вдоль по потоку в моменты времени $t = 4,5; 6$ с, причем координата $x = 0$ соответствует сечению перехода цилиндрической трубы в прилив, а сечение сопряжения выступа с выходным кольцевым каналом отмечено

пунктиром. Отмеченное интенсивное охлаждение жидкости вблизи сечения сужения потока приводит к резкому возрастанию вязкости жидкости в этой области. Примерно через 3 с после начала охлаждения на контактной поверхности в окрестности указанного сечения зарождается фронт фазового превращения, температура становится ниже температуры ликвидуса T_L . В окрестности T_L небольшие изменения температуры приводят к существенному изменению вязкости жидкости. Кривые на рис. 4 показывают, что коэффициент вязкости в слоях жидкости, примыкающих к контактной поверхности, в течение короткого времени меняется на несколько порядков, причем условно принято, что повышение вязкости на три порядка соответствует переходу жидкости в твердое состояние. Из рис. 3 и 4 следует, что заметная область с твердой фазой образуется примерно через 6 с после



начала охлаждения.

Рис. 4. Распределение безразмерного коэффициента вязкости на различных расстояниях от контактной поверхности

Повышение вязкости существенно сказывается на характере течения жидкости. На рис. 1 и 2 представлены профили скорости в характерных сечениях потока и линии тока в моменты времени $t = 4,5; 6$ с от начала охлаждения, а на рис. 3 отмечен характер изменения давлений p_0 и p_c в моменты времени $t = 3; 4-5; 6$ с. Можно отметить следующие закономерности.

В начальный период охлаждения картина течения ² меняется незначительно. Заметной деформации профилей не происходит. Линии тока также трансформируются незначительно. Однако наиболее чувствительным к изменению температуры и вязкости является давление. Уже к моменту времени $t = 3$ с падение давления вдоль по потоку существенно увеличивается. Дальнейшее охлаждение приводит к существенному изменению профилей скорости и картины линий тока. Графики скорости на рис. 1 показывают, что вблизи контактной поверхности «кокиль – отливка» формируется зона малых, а затем нулевых скоростей потока, причем последнее связано с появлением твердой фазы. Эта зона локализуется в окрестности сечения сужения потока и простирается вниз по течению в кольцевой трубе. К моменту времени $t = 6$ с этот максимум достигает значения $u_{\max} = 3$

(в начальный момент $u_{\max} \approx 1,5$), причем максимум скорости с течением времени поджимается к внутренней стенке кольцевой полости. Об этом же свидетельствует картина линий тока, приведенная на рис. 2. Расположение линий тока показывает, что циркуляционное движение в полости выступа также деформируется, отходит от стенок выступа и поднимается к поверхности сопряжения выступа с цилиндрической стенкой.

ВЫВОД

Результаты проведенного анализа закономерностей движения расплавленных металлов и сплавов в каналах сложной геометрии представляют в совокупности научную основу для разработки специальных технологий формирования тонкостенных корпусных литых изделий (технологии непрерывного литья, жидкой штамповки, литья под низким и регулируемым давлением и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Р а с ч е т ы процессов литья / Р. И. Есьман [и др.]. – Минск: Вышэйш. шк., 1977. – 264 с.
2. П о л я н и н, А. Д. Методы решения нелинейных уравнений математической физики и механики / А. Д. Полянин, В. Ф. Зайцев, А. И. Журов. – М.: Физматлит, 2005. – 256 с.

Представлена кафедрой
промтеплоэнергетики и теплотехники

Поступила 05.05.2009

УДК 532.5, 536.2, 621.183, 621.039.5

СНИЖЕНИЕ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА ЦИЛИНДРА СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН, РАБОТАЮЩИХ НА ЗАКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ

**Кандидаты техн. наук КАЩЕЕВ В. П., ХАИМОВ В. А., инж. ВОРОНОВ Е. О.,
асп. КАЩЕЕВА О. В., докт. техн. наук СОРОКИН В. Н.**

*Белорусский национальный технический университет,
АООТ «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию
энергетического оборудования имени И. И. Ползунова»,
РУП «Минскэнерго»,
Национальная академия наук Беларуси*

На внутренней поверхности нагрева труб котлов сверхкритического давления при окислении их металла образуется оксидная пленка толщиной от 0,1 до 0,25 мм. При изменении температуры у металла труб и пленки происходит различное расширение (из-за разных коэффициентов температурного расширения), что ослабляет сцепление пленки с металлом и при соответствующих условиях, зависящих прежде всего от толщины пленки