

УДК 621.74.02:  
669.24/.29

А.Ю. Коротченко,  
С. Поляков, Ю. Баст,  
Ю.О. Фокин, Л.В. Пастухов

Аннотация

Summary

## Режимы охлаждения, обеспечивающие получение отливок с аморфной структурой

### Methods of Making Casting with an Amorphous Structure

A.Y. Korotchenko, S. Polyakov, Y. Bast, Y.O. Fokin, L.V. Pastukhov

В статье рассмотрены основные способы получения аморфных металлов и сплавов. Приведены методы получения отливок с аморфной структурой в виде лент и прутков. Дана оценка возможных скоростей охлаждения отливки в криогенной жидкости и скоростей охлаждения отливки при контактном взаимодействии с массивным холодильником. Показано, что рассчитанные значения скоростей охлаждения достаточны для получения фасонных микроотливок с аморфной структурой.

#### Ключевые слова

Аморфные сплавы, микроотливки, критическая скорость охлаждения, температура стеклования, коэффициент теплоотдачи.

The article discusses the main methods of making amorphous metals and alloys. Methods of making castings with an amorphous structure in the form of bands and rods are presented. Possible casting cooling rates in a cryogenic liquid and casting cooling rates at contact interaction with a massive chill are evaluated. It is shown that the calculated cooling rate values are sufficient for making shaped microcastings with an amorphous structure.

#### Key words

Amorphous alloys, microcastings, critical cooling rate, vitrification temperature, heat transfer coefficient.

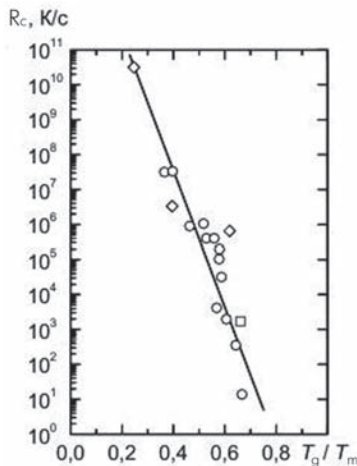
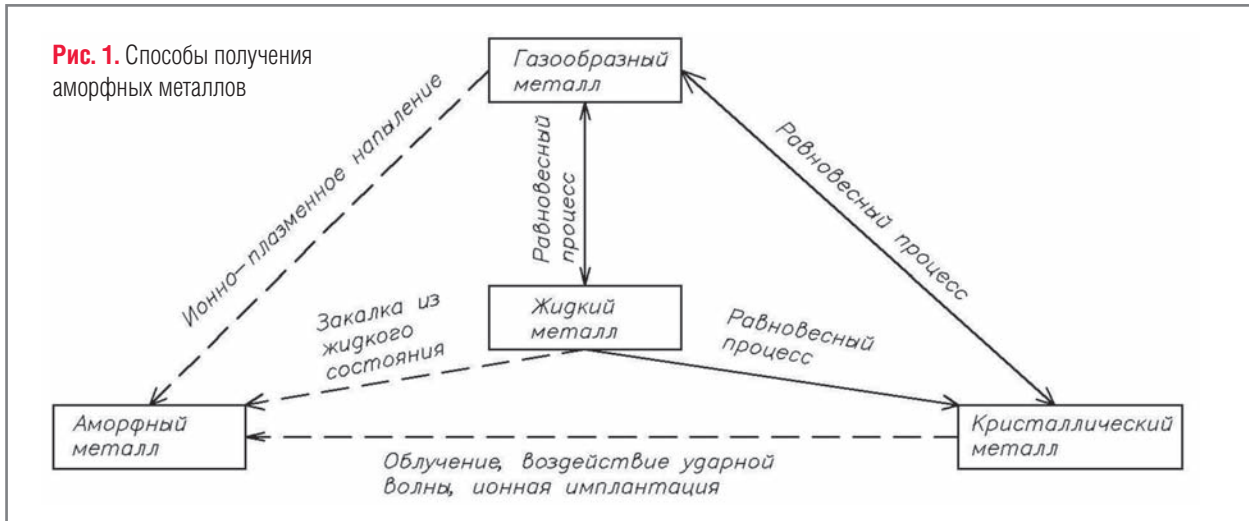
#### Введение

Открытие аморфных металлических сплавов в 60-е гг. XX в. внесло большой вклад в науку о металлах, существенно изменив наши представления о них. Оказалось, что металлические сплавы с аморфной структурой резко отличаются по своим свойствам от металлических сплавов с кристаллической структурой. Очевидное преимущество аморфной структуры – отсутствие границ зерен, дает совершенно новый уровень качества деталей: высокую прочность, пластичность, коррозионную стойкость. Формирование аморфной структуры металлов также приводит к фундаментальным изменениям магнитных и электрических свойств.

На сегодня известно большое число способов, позволяющих получать аморфные металлы и сплавы, основная часть которых показана на **рис. 1** [1]. Равновесные обратимые процессы изменения состояния металлов

показаны на **рис. 1** сплошными линиями, а неравновесные – штриховыми. Как следует из **рис. 1**, получение аморфной структуры связано с неравновесными процессами. Наиболее распространенный способ получения аморфных металлов сводится к их закалке из жидкого состояния (затвердевание с высокой скоростью охлаждения). При охлаждении с обычными скоростями расплав затвердевает при очень малых переохлаждениях, фактически при равновесной температуре плавления  $T_r$ , образуя кристаллическую структуру. Однако, если скорость охлаждения достаточно большая, расплав можно переохладить существенно ниже  $T_r$ . Температура, ниже которой получаем аморфную структуру, называется температурой стеклования и обозначается  $T_g$ . Способность вещества к аморфизации можно оценить по критической скорости охлаждения  $R_c$  до  $T_g$ . Чем меньше  $(T_r - T_g)$ , тем легче сплав аморфизуется. У чистых металлов  $R_c$  крайне велика

**Рис. 1.** Способы получения аморфных металлов



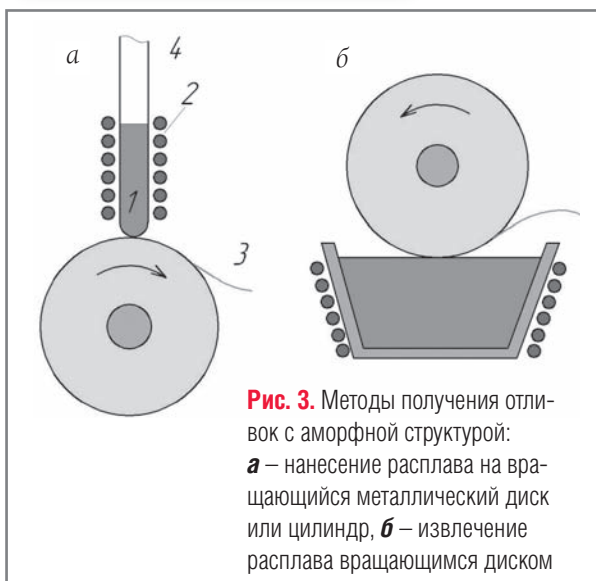
**Рис. 2.** Соотношение между  $R_c$  и  $T_g/T_m$  для чистых металлов ( $\diamond$ ), сплавов металл – металл ( $\square$ ) и металл – металлоид ( $\circ$ ) [1]

$10^{10} \dots 10^{12}$  К/с, поэтому их аморфизация сильно затруднена. Для уменьшения  $(T_m - T_g)$  разработаны специальные аморфные сплавы, состав которых можно разделить на две основные группы: металл – металл (Cu–Cd, Cu–Zr, Hf–Ni, Nb–Ni и т.д.) и металл – металлоид с 15...30% металлоидов (Fe–B, Ni–P, Co–Si–B, Pd–Ni–P и т.д.). На **рис. 2** показано изменение критической скорости охлаждения, в зависимости от  $T_g/T_m$ . В современных аморфных сплавах аморфизация наступает уже при  $R_c = 10^2 \dots 10^4$  К/с и менее.

### Методы получения отливок с аморфной структурой

Для получения литых заготовок в форме лент и проволоки наиболее часто используют два метода: в 1-ом жидкий расплав наносят на внешнюю цилиндрическую поверхность вращающегося диска (колеса) – **рис. 3, а**, во 2-ом расплав извлекается вращающимся диском (**рис. 3, б**).

Обод металлического диска или цилиндра изготавливают из материала высокой теплопроводности (меди, бронзы, латуни). По схеме на **рис. 3, а** расплав вытекает под небольшим давлением (0,2 атм.) через инжекционное сопло из плавящего кварца или окиси алюминия. Струя попадает на поверхность быстро вращающегося колеса и затвердевает в виде непрерывной ленты шириной 1...20 мм и толщиной 20...40 мкм. Во 2-ом методе (**рис. 3, б**) заостренный обод



**Рис. 3.** Методы получения отливок с аморфной структурой: **а** – нанесение расплава на вращающийся металлический диск или цилиндр, **б** – извлечение расплава вращающимся диском

диска захватывает расплав, который затем затвердевает и самопроизвольно отделяется в виде коротких проволочек. Частота вращения диска или цилиндра должна быть такой, чтобы обеспечить линейную скорость обода  $\geq 50$  м/с.

Высокая скорость охлаждения заготовок в этих методах достигается кратковременным контактом расплава с частью поверхности массивного диска или цилиндра, нагрев которого быстро снимается в последующей более длительной фазе охлаждения. Эти методы легко реализуются конструктивно для получения тонких лент и проволоки и, может быть, для некоторых профильных конфигураций, но фасонные отливки так получить невозможно. Связано это, в первую очередь, с тем, что для отливок необходима литейная форма, при охлаждении отливки в которой высокая начальная скорость охлаждения быстро уменьшается за счет повышения пристеночной температуры формы вследствие низкой теплопроводности обычных формовочных мате-

риалов. Таким образом, основная проблема достижения высоких скоростей охлаждения в форме связана с устранением или уменьшением ее разогрева.

*Очевидные пути решения проблемы – повышение теплопроводности и увеличение тепловой аккумуляции формы.* Однако свойства современных материалов, используемых для литейных форм, не дают существенного выигрыша в увеличении скорости охлаждения.

Для увеличения скорости охлаждения отливки рассмотрим несколько технологических способов.

*Способ I* – охлаждение отливки с формой в криогенной жидкости. В этом случае тепловой поток будет определяться отношением теплопроводности формы и ее толщины  $\lambda_{\text{ф}}/\delta_{\text{ф}}$ , а также коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$  с поверхности формы в кипящую криогенную жидкость. Известно, что при определенных условиях вынужденной конвекции эти коэффициенты могут принимать высокие значения.

*Способом II* может быть организация плотного контактного теплообмена через поверхность формы с массивным твердым холодильником.

Рассмотрим подробнее особенности охлаждения отливки каждым из этих способов.

**Коэффициент теплоотдачи при охлаждении отливки в криогенной жидкости.** При охлаждении формы с отливкой в криогенной жидкости температура стенки формы  $T_{\text{с}}$ , контактирующей с охлаждающей средой, намного выше температуры кипения жидкости (так, у азота  $T_{\text{к}} = 77,4\text{К}$  при атмосферном давлении). Кипение происходит, в основном, в пристеночной области с благоприятными термодинамическими условиями (перегревом) образования паровых пузырьков и с открытой поверхности жидкости.

Различают два основных *режима кипения жидкостей*: пузырьковый и пленочный, которые определяют и два *режима охлаждения поверхности*. Пузырьковый режим – начало всякого процесса кипения. Пленочный режим связывают с кризисом в развитии пузырькового кипения, то есть увеличение парообразования ведет к объединению отдельных пузырьков в сплошную газовую подушку, разделяющую охлаждающую поверхность и охлаждающую жидкость. Интенсивность теплообмена при этом резко снижается. Этот нестабильный процесс состоит в периодическом прорыве газовой подушки и повторном развитии пузырькового кипения – второе кризисное явление. Иногда говорят о «гистерезисе» теплообмена при кипении.

Теплообмен между стенкой формы и охлаждающей средой, который, вследствие турбулизации в граничном слое, носит комбинированный характер, состоит из охлаждения пристеночных слоев жидкости (за счет интенсивного парообразования) и принудительного конвектив-

ного охлаждения двухфазным потоком стенки формы. Интенсивность последнего зависит от скорости потока или от числа Рейнольдса ( $Re = vL/\nu$ ), где  $v$  – скорость набегающей на поверхность формы жидкости,  $L$  – характерный размер поверхности формы,  $\nu$  – кинематическая вязкость. При высоких скоростях жидкости в пограничном слое парообразование может подавляться из-за срыва пузырьков пара, еще не достигших критического диаметра, достаточного для отрыва от стенки. Такие пузырьки уносятся потоком от стенки формы и захлопываются с выделением энергии. Теплообмен в этом случае будет проходить, преимущественно, по модели принудительной конвекции.

Интенсивность теплообмена при конвективном теплообмене в жидкости характеризуется числом Нуссельта  $Nu = \alpha\delta_{\text{т}}/\lambda$ , где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи Ньютона,  $\delta_{\text{т}}$  – толщина теплового пограничного слоя жидкости, где температура изменяется от температуры стенки до температуры жидкости в удаленных слоях,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности жидкости. Число Нуссельта при обтекании пластины потоком жидкости в турбулентном пограничном слое ( $Re > 4 \cdot 10^4$ ) находят по известной формуле с использованием критерия Прандтля –  $Pr$ , который для жидкого азота при  $T = -190^{\circ}\text{C}$  равен 20.

Для оценки эффективного значения коэффициента теплоотдачи, учитывающего одновременный эффект от кипения и конвективного теплообмена, существует много приближений. Наиболее простое и достаточно точное приближение взято из работы [2]. В результате, получили оценочное значение коэффициента  $\alpha_0$  в условиях вынужденной конвекции потока вдоль охлаждаемой поверхности формы с использованием  $Pr = 20$ . На границе перехода в граничном слое от ламинарного режима к турбулентному  $Re = (3 \cdot 10^5 \dots 3 \cdot 10^6)$  и это число, конечно, зависит от состояния поверхности формы и развития режима кипения и может быть значительно меньше. Рассмотрим условия теплообмена при максимальном значении  $Re$ , имея в виду, что реальное значение может быть существенно меньше:

$$Nu = 0,037 \cdot (3 \cdot 10^6)^{0,8} 20^{0,4} \approx 18634.$$

Толщину пограничного теплового слоя приближенно можно оценить по критериальному соотношению, взятому из работы [3], подставив  $L = 0,02$  м:

$$\delta_{\text{т}} = L / \sqrt[3]{Re Pr} = 0,02 / \sqrt[3]{3 \cdot 10^6 \cdot 20} = 0,26 \cdot 10^{-5} \text{ м},$$

где  $L$  – характерный размер формы. Столь малое значение  $L$  связано с тем, что получение аморфной структуры возможно лишь для микроотливок.

Тогда коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции, без учета кипения:

$$\alpha_0 = Nu \cdot \lambda / \delta_{\text{т}} = 18634 \cdot 0,14 / 0,26 \cdot 10^{-5} = 10^9 \text{ Вт/м}^2\text{К}.$$

По формуле из работы [ ] находим эффективное значение коэффициента теплоотдачи.

$$\alpha = 10^9 \cdot \sqrt{1 + (4,7 \cdot 10^4 / 10^9)^2} \approx 10^9 \text{ Вт/м}^2\text{К}$$

Это означает, что вынужденная конвекция в данных условиях вносит в теплообмен преобладающий эффект.

**Коэффициент теплоотдачи при контактном взаимодействии с массивным холодильником.** Для анализа контактного теплообмена необходимо, прежде всего, определить площадь фактического контакта.

При контакте двух поверхностей в общем случае различают три площади [4]:

- контакта  $S_{\phi}$ , представляющую собой сумму малых площадок контакта, образованных в результате смятия выступов шероховатости, – *фактическую*;
- $S_k$ , обусловленную волнистостью, и образованную из площадок смятия отдельных волн (на этих площадках происходит дискретное касание микровыступов) – *контурную*;
- $S_n$ , определяемую геометрическими размерами тела и являющуюся геометрическим местом всех возможных точек фактического контакта, – *номинальную*.

При сравнительно малых размерах номинальной площади волнистость можно не учитывать, то есть принять  $S_k = 0$ . В расчетах используется относительная площадь контакта  $\eta = S_{\phi} / S_n$ , значение которой можно определить по формуле из работы [4], и затем рассчитать коэффициент теплоотдачи при первоначальном нагружении по коэффициенту теплопроводности газа  $\lambda_c$  и среднему коэффициенту теплопроводности контактирующих тел  $\lambda_m$ . В расчетах были приняты следующие значения: для воздуха при 300К  $\lambda_c = 26,2 \cdot 10^{-3}$  Вт/(м·К); для меди при 300К  $\lambda_m = 401$  Вт/(м·К) и предел прочности материала  $\sigma_b = 440$  МПа. Подставив в формулу из работы [3] значения перечисленных параметров, получим искомое значение коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_x = \alpha_c + \alpha_m = (26,2 \cdot 10^{-3} \cdot 2) / (1,6 \cdot 10^{-6}) + 1,6 \cdot 10^{-4} [(401/0,73 \cdot 1,05) \cdot (45/3 \cdot 440)] = 33750 + 284800 \approx 3,19 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$$

**Возможные скорости охлаждения отливки в криогенной жидкости.** Рассмотрим в качестве примера охлаждение в жидком азоте формы с отливкой типа *плита*. В качестве аморфного сплава примем сплав  $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ , материал формы – графит.

Положим, что толщина стенки формы незначительна, тогда можно пренебречь кривизной температурного поля в ней и потерей потока тепла, идущего на разогрев формы. Следовательно, потоки тепла на границах контакта с жидким металлом и с охлаждающей жидкостью для формы равны. Этот известный прием позволяет ввести эффективный коэффициент теплоотдачи от отливки к охлаждающей среде через обратную величину от суммы тепловых сопротивлений формы  $1/(\lambda_{\phi}/\delta_{\phi})$  и границы *форма / охлаждающая среда*  $1/\alpha$ , где  $\lambda_{\phi}$ ,  $\delta_{\phi}$  – теплопроводность и

толщина стенки формы соответственно.

Очевидно, что для создания условий максимальной теплоотдачи необходимо  $\lambda_{\phi}/\delta_{\phi}$  увеличивать, то есть уменьшать толщину стенки формы и увеличивать коэффициент теплопроводности. Так, предельным значением теплопроводности обладает современный материал графен (~ 4000...5000 Вт/мК). Толщину формы из технологических соображений можно принять 1,0 мм. Тогда предельное значение  $\lambda_{\phi}/\delta_{\phi} = 5000/0,001 = 5 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>·К. Однако и для обычного графита коэффициент теплопроводности равен ~ 350 Вт/мК. Отсюда коэффициент кондуктивной проводимости графитовой формы, с толщиной стенки в 1 мм, может достигать:  $\lambda_{\phi}/\delta_{\phi} = 350/0,001 = 3,5 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>·К.

Из вышеизложенного анализа тепло-гидродинамических условий при охлаждении отливки в жидком азоте мы получили коэффициенты теплоотдачи от  $\alpha = 4,7 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>·К, соответствующего пузырьковому кипению при свободной конвекции, до  $\alpha = 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>·К – при вынужденной конвекции за счет турбулентного обтекания пластины двухфазным парожидкостным потоком. *Таким образом, для принятых параметров формы, в зависимости от коэффициента теплоотдачи в жидкий азот, эффективное значение теплоотдачи, с учетом термосопротивления формы, будет изменяться:*

$$\text{от } \alpha_{\min}^{\text{эф}} = \alpha \cdot \alpha_{\tau} / (\alpha_{\tau} + \alpha) = (4,7 \cdot 10^4 \cdot 3,5 \cdot 10^5) / (4,7 \cdot 10^4 + 3,5 \cdot 10^5) = 4,14 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2\text{К}$$

$$\text{до } \alpha_{\max}^{\text{эф}} = \alpha \cdot \alpha_{\tau} / (\alpha_{\tau} + \alpha) = (10^9 \cdot 3,5 \cdot 10^5) / (10^9 + 3,5 \cdot 10^5) \approx 3,5 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$$

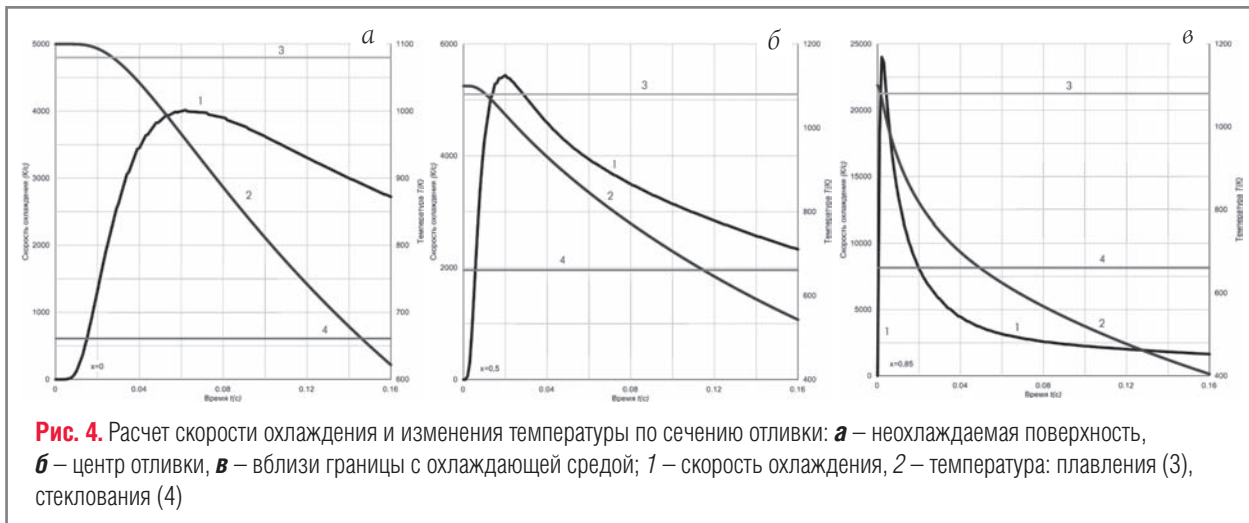
То есть, начиная с некоторых значений теплоотдачи с поверхности формы, термосопротивление формы оказывает преобладающее влияние на эффективный теплообмен отливки. В этом случае задача снижения термосопротивления формы становится более важной, чем увеличение коэффициента теплообмена в жидкий азот, а уравнение теплообмена на границе *отливка / форма* заменяется эквивалентным уравнением теплообмена на границе *отливка / охлаждающая среда* с эффективным коэффициентом теплообмена, учитывающим тепловое сопротивление формы:

$$-\lambda \nabla T_n = \alpha^{\text{эф}} (T_n - T_c)$$

Полученные соотношения позволяют сформулировать одномерную модель охлаждения отливки в форме, с помощью которой можно оценить скорости охлаждения от температуры ликвидус  $T_L$  до температуры аморфизации  $T_g$ .

Предложена одномерная модель теплообмена для пластины толщиной  $\delta > 0$ ,  $x \in [0, \delta]$ ,  $t \geq 0$ , при охлаждении только с одной стороны, которая носит оценочный характер, поэтому теплофизические коэффициенты принимаются постоянными и определяются через коэффициент температуропроводности  $a = \lambda/c\rho$ .

Значение коэффициента теплообмена зависит от со-



**Рис. 4.** Расчет скорости охлаждения и изменения температуры по сечению отливки: **а** – неохлаждаемая поверхность, **б** – центр отливки, **в** – вблизи границы с охлаждающей средой; 1 – скорость охлаждения, 2 – температура: плавления (3), стеклования (4)

стояния жидкой среды на границе с формой. В общем случае, этот коэффициент может быть принят условно равным значению, соответствующему развитому пузырьковому режиму кипения жидкого азота при свободной конвекции, и повышаться до значений, пропорциональных линейной скорости обтекания при преобладании эффекта вынужденной турбулентной конвекции.

Для анализа модели и способа расчета температурных полей будем использовать безразмерный критерий подобия Био:

$$Bi = \alpha^{3\Phi} \delta / \lambda,$$

где  $\delta$  – толщина стенки отливки (рассматриваем теплообмен только с одной стороны).

Коэффициенты теплопроводности литых аморфных сплавов на основе циркония значительно ниже, чем для обычных литейных сплавов, и равны 5...20 Вт/мК. Коэффициенты теплоотдачи в среде жидкого азота при свободной конвекции, в зависимости от характера кипения (пузырьковый/пленочный) и при вынужденной турбулентной конвекции, для принятых ранее условий, лежат в интервале от  $4,14 \cdot 10^4$  до  $3,5 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>·К. Для  $\delta = 0,001$  м получили диапазон изменения критерия Био в интервале температур, соответствующих аморфному переходу:

$$Bi \in [(4,14 \cdot 10^4 \cdot 10^{-3})/20; (3,5 \cdot 10^5 \cdot 10^{-3})/20] = [2,07; 17,5].$$

Условия малой интенсивности теплообмена здесь не выполняются, так как оценочное значение  $Bi = [2,07; 17,5]$ . Поэтому следует воспользоваться полным аналитическим решением третьей краевой задачи теплообмена при постоянных теплофизических коэффициентах.

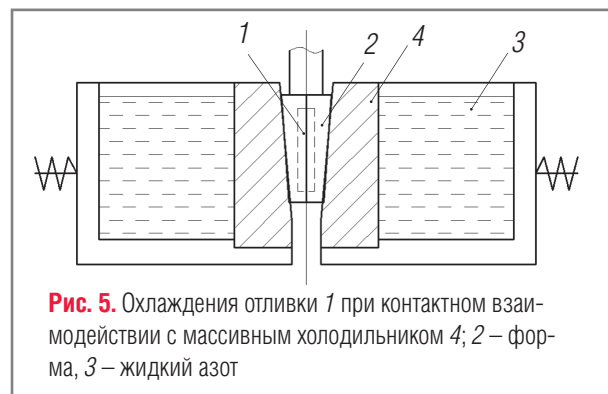
Зная распределение температуры по сечению пластины в любой момент времени, нетрудно определить скорость охлаждения отливки. Приведем данные для сплава  $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ , используемые в оценочных расчетах:  $c_p = 698$  Дж/К·кг;  $\lambda = 20$  Вт/К·м;  $\rho = 6820$  кг/м<sup>3</sup>;  $a = 4,2 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $T_r = 1080$ К;  $T_g = 661$ К.

На **рис. 4** показана табуляция точного решения для охлаждения отливки в виде неограниченной пластины в графитовой форме с толщиной стенки 1 мм. Охлаждение – только со стороны контакта с охлаждающей средой. В расчете принимали начальную температуру  $T_0 = 1100$ К и эффективный коэффициент теплоотдачи  $\alpha^{3\Phi} = 4,14 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>·К.

Из приведенных расчетов видно, что если для данного сплава критическая скорость охлаждения для подавления кристаллизации  $< 1,5 \cdot 10^3$ , аморфная структура в отливке вполне достижима по всему сечению. Наиболее медленно охлаждаемая часть отливки, как и ожидалось, находится на неохлаждаемой поверхности.

Существующие в литературе данные показывают высокую склонность к аморфизации промышленных циркониевых сплавов (Vit 106) близкого химсостава, при достаточно малых скоростях охлаждения  $\sim 10^{-1}$  К/с. Таким образом, полученные оценки скоростей охлаждения отливки вполне достаточны для создания аморфной структуры модельного литейного сплава  $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ .

Для более точной оценки следует сравнить тепловые потоки с поверхности формы с критическими для заданного режима. Однако это требует проведения серии специальных экспериментов.



**Рис. 5.** Охлаждения отливки 1 при контактном взаимодействии с массивным холодильником 4; 2 – форма, 3 – жидкий азот



**Рис. 6.** Распределение температур по сечению отливки, формы и холодильника:  $x \in [0; 0,5]$  – отливка;  $x \in [0,5; 1,5]$  – форма;  $x \in [1,5; 11,5]$  – холодильник

**Возможные скорости охлаждения отливки при контактом взаимодействии с массивным холодильником.** Рассмотрим в качестве примера охлаждение формы с отливкой типа *плита*. В качестве аморфного сплава принят сплав  $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ , материал формы и холодильника – медь. На **рис. 5** – схема охлаждения отливки при контактом взаимодействии формы с массивным холодильником. В отличие от предыдущего способа охлаждения (где теплоотвод – с одной поверхности отливки), в этом варианте можно реализовать схему с теплоотводом с обеих поверхностей отливки.

Охлаждение отливки рассчитывали с использованием пакета программ COMSOL Multiphysics, решением одномерной модели охлаждения отливки, с учетом прогрева формы и холодильника. В связи с симметричностью охлаждения отливки, расчеты проводили для ее половины. На **рис. 6** – типичное распределение температур по сечению половины отливки, формы и холодильника.

На **рис. 7** – результаты расчетов скорости охлаждения

и изменения температуры по сечению половины отливки. Результаты, представленные на **рис. 7**, показывают, что при предложенном способе охлаждения скорости охлаждения отливки достигают  $\sim 4 \cdot 10^3$  К/с, что *достаточно для получения фасонных микроотливок с аморфной структурой*.

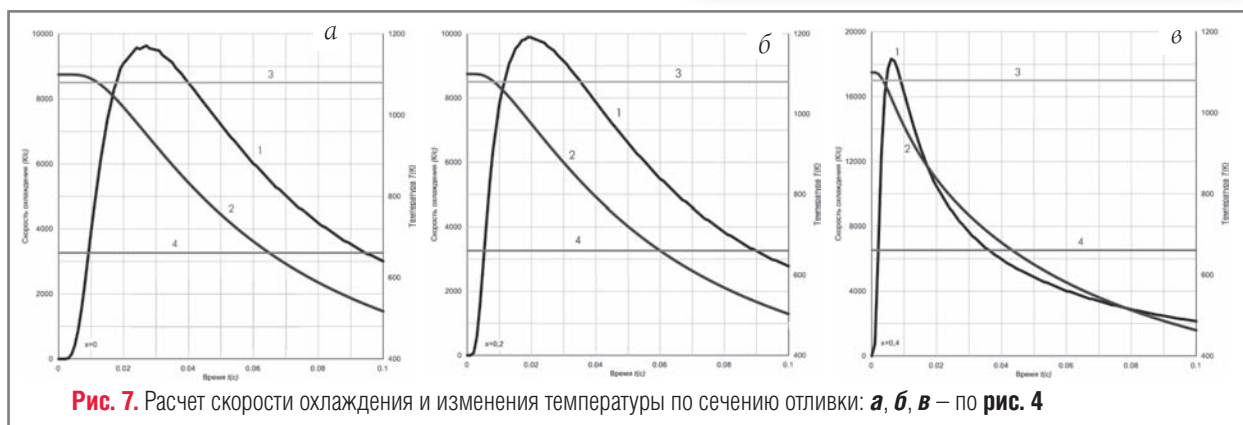
В заключение можно отметить, что приведенные в работе модели интенсивного охлаждения могут быть использованы для разработки технологических процессов получения фасонных микроотливок из существующих аморфных сплавов. В настоящее время такая работа проводится в МГТУ им. Н.Э. Баумана, совместно с немецкими специалистами.

## Список литературы

- 1. Аморфные металлы.** Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. / Под ред. Масумото Ц. – М.: Metallurgia, 1987. – 328 с.
- 2. Луканин В.Н., Шатров М.Г., Камфер Г.М. и др.** Теплотехника: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1999. – 671 с.
- 3. Гухман А.А.** Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена. – М.: Высшая школа, 1974. – 327 с.
- 4. Контактное термическое сопротивление.** Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. – М.: Энергия, 1977. – 328 с.

## Сведения об авторах

- А.Ю. Коротченко** – канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Литейные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kor\_15@mail.ru
- С. Поляков** – Технический университет «Горная академия Фрайберг», Германия
- Ю. Баст** – там же
- Ю.О. Фокин** – студент 6 курса кафедры «Литейные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана
- Л.В. Пастухов** – студент 6 курса, там же



**Рис. 7.** Расчет скорости охлаждения и изменения температуры по сечению отливки: **а, б, в** – по **рис. 4**