электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

УДК 621.74.02:669.24/29

СПОСОБ ОХЛАЖДЕНИЯ ОТЛИВКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ ОБРАЗОВАНИЕ АМОРФНОЙ СТРУКТУРЫ

***Фокин Ю.О.**, аспирант*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Литейные технологии»

Научный руководитель: Коротченко А.Ю., к.т.н, доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
bauman@bmstu.ru

Введение

Аморфные металлы и в частности массивные металлические стекла являются новым перспективным классом конструкционных материалов, обладающих рядом уникальных механических, электрических и магнитных свойств [1].

Аморфная структура характеризуется отсутствием дальнего порядка атомов (как у поликристаллических тел) и трёхмерной периодичности в построении атомов. Аморфные сплавы (или металлические стекла) представляют большой интерес ввиду уникальности их физических и химических свойств. Вследствие того, что у аморфных сплавов отсутствует дальний порядок атомов, для них не характерно наличие дислокаций, присущих кристаллам. Благодаря химической однородности аморфные сплавы обладают повышенной коррозионной стойкостью. Также аморфные сплавы обладают значительно меньшим удельным сопротивлением, высокой прочностью на сжатие, высокой вязкостью разрушения [2].

При обычных условиях при охлаждении многокомпонентного сплава термодинамически более выгодным является формирование поликристаллической структуры, но если обеспечить высокие скорости охлаждения, то переохлажденная жидкость затвердеет, образовав аморфную структуру. Если удастся обеспечить такие скорости охлаждения, то рост кристаллов при охлаждении отливки будет подавлен и можно ожидать получения аморфной структуры по всему сечению отливки.

Рис. 1. Диаграмма время-температура-превращение (ТТТ)

С теоретической точки зрения любая жидкость при достаточно большой скорости охлаждения может избежать кристаллизации и перейти в стеклообразное состояние (рис.1). Для каждой жидкости существует критическая скорость охлаждения Rc, необходимая для ее стеклования [1].

В 1960-2000гг., известные на тот момент аморфные сплавы имели критические скорости охлаждения Rc ~ $10^3 \ldots 10^6$ К/с. При такой скорости охлаждения, можно получать изделия с толщиной стенки до 200мкм.

Самым распространенным способом получения аморфных сплавов является метод спиннингования (рис. 2) [1]. Высокая скорость охлаждения расплава при данном способе достигается путем кратковременного контакта расплава с частью поверхности массивного диска или цилиндра, нагрев которого быстро снимается в последующей более длительной фазе охлаждения. Этот способ легко реализуются конструктивно для получения тонких лент и проволоки и, может быть для некоторых профильных конфигураций, но фасонные отливки получить невозможно.

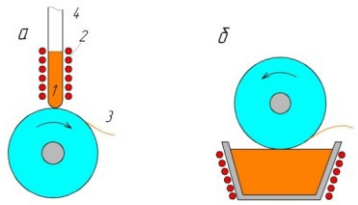

Рис.2. а) – нанесение расплава на вращающийся металлический диск или цилиндр;
б) –извлечение расплава вращающимся диском

Связано это в первую очередь с тем, что для фасонных отливок необходимо использовать литейную форму, а при охлаждении отливки в форме высокая начальная скорость охлаждения быстро уменьшается за счет повышения пристеночной температуры формы вследствие низкой теплопроводности обычных формовочных материалов. Одновременно с этим повышается риск непролива формы за счет высокого теплоотвода и маленькой толщиной стенки отливки.

Охлаждение за счет контакта формы с массивным холодильником

Решить перечисленные проблемы можно разделив во времени процесс формообразования отливки и ее охлаждения. Такой процесс можно реализовать путем предварительного нагрева формы до температуры близкой к температуре плавления сплава, заливки формы и последующего охлаждения отливки совместно с литейной формой (теплоотвод ведется с поверхности формы). Схема процесса охлаждения изображена на рис.3.

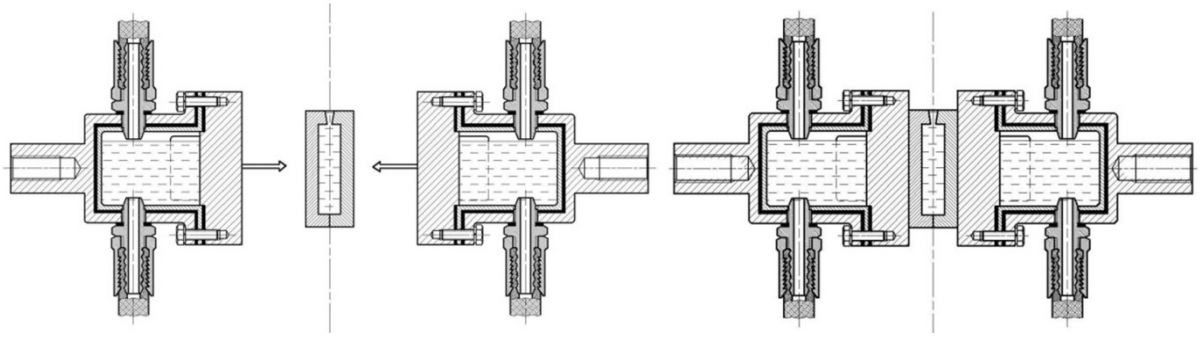

Рис. 3. Схема процесса охлаждения.

Охлаждение ведется за счет контакта горячей формы с холодным медным холодильником. Низкая температура медного холодильника поддерживается криогенной жидкостью (жидкий азот).

Для расчета скорости охлаждения отливки необходимо определить коэффициент тепловой проводимости контакта «форма-холодильник». Поверхностные и механические свойства при контакте «твердое тело – твердое тело» определяют фактическую площадь контакта, от которой зависит величина сопротивления стягивания. Так же как и в случае электрической проводимости, в котором данная составляющая контактного сопротивления появляется вследствие уменьшения проходного сечения для электронов от номинальной площади контакта, приводящего к увеличению плотности электрического тока в областях фактического, происходит увеличение плотности теплового потока вблизи областей фактического контакта (стягивание линий теплового потока) (рис.4) [3].

http://sntbul.bmstu.ru/doc/636579.html

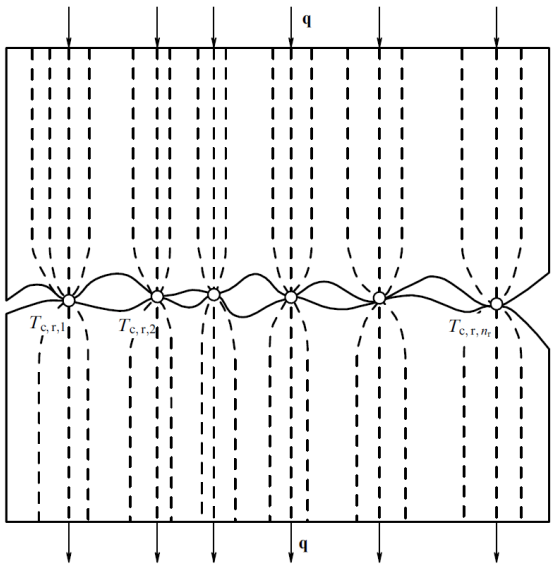

Рис. 4. Стягивание линий теплового потока к зонам фактического контакта.

Для расчета термической проводимости фактического контакта с учетом сопротивления стягивания используется следующая полуэмпирическая зависимость, полученная в результате обобщения обширных экспериментальных данных, позволяющая получить достаточно достоверные значения для широкого круга материалов [3]:

$$\alpha_{th,s} = 1{,}15 \cdot 10^4 \lambda_{eq} \left(\frac{P_n^2}{\Omega_b E} \frac{T_c}{T_{melt}} K^2 \right)^{0{,}302}, \quad (1)$$

$$\lambda_{eq} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_1 / \lambda_1 + \sigma_2 / \lambda_2}, \quad (2)$$

где λ_{eq} – эквивалентная теплопроводность контактирующих материалов, Вт (м К)$^{-1}$; σ_1, σ_2 – средние высоты микронеровностей взаимодействующих поверхностей, м; P_n – номинальное контактное давление, Па; Ω_b – предел прочности более мягкого материала, Па; $E = 2E_1E_2 / (E_1 + E_2)$ – приведенный модуль упругости контактирующих материалов, Па; T_c – средняя контактная температура, К; T_{melt} – температура плавления более легкоплавкого материала, К; K – коэффициент, показывающий изменение геометрических характеристик соприкасающихся поверхностей, зависящий от среднего арифметического отклонения профиля следующим образом:

$$K = 1 \text{ при } (\sigma_1 + \sigma_2) > 3 \cdot 10^{-5} \text{ м},$$

$$K^2 = \left(\frac{30\cdot 10^{-6}}{\sigma_1+\sigma_2}\right)^{2/3} \text{ при } 10^{-5} < (\sigma_1+\sigma_2) \le 3\cdot 10^{-5} \text{ м},$$

$$K = \frac{15\cdot 10^{-6}}{\sigma_1+\sigma_2} \text{ при } (\sigma_1+\sigma_2) \le 10^{-5} \text{ м},$$

Расчет значения коэффициента тепловой проводимости контакта.

$$\alpha_{th,s} = 1{,}15\cdot 10^4 \lambda_{eq}\left(\frac{P_n^2}{\Omega_b E}\frac{T_c}{T_{melt}}K^2\right)^{0{,}302},$$

λ_{eq} находим по формуле $\lambda_{eq} = \dfrac{\sigma_1+\sigma_2}{\sigma_1/\lambda_1+\sigma_2/\lambda_2}$, материал формы и холодильника – медь, теплопроводность меди существенно зависит от температуры [4]. Температура формы – 1100 К, температура холодильника – 90 К. $\sigma_1 = \sigma_2 = 0{,}8\cdot 10^{-6} м$, что соответствует чистовому шлифованию обеих поверхностей.

$$\lambda_{eq} = \frac{0{,}8\cdot 10^{-6}\cdot 400 + 0{,}8\cdot 10^{-6}\cdot 345}{0{,}8\cdot 10^{-6}/400 + 0{,}8\cdot 10^{-6}/345} = 370,$$

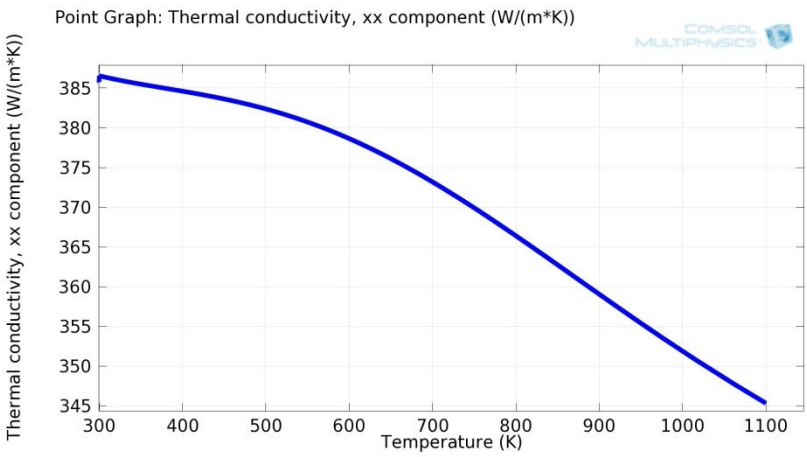

Рис. 5. Зависимость теплопроводности меди от температуры

$\Omega_b = 215 МПа$, что соответствует пределу прочности более мягкого (в данном случае более горячего) материала.

$E = 123000 МПА$ – модуль упругости меди.

Значение T_c найдем по формуле $\overline{T}_{c,r} = \dfrac{T'_{w,2} + (\lambda_2/\lambda_1)T''_{w,2}}{1+\lambda_2/\lambda_1}$

$$T_c = \frac{1100 + \frac{400}{345}90}{1 + \frac{400}{345}} = 557,718K$$

$T_{melt} = 1356K$ – температура плавления меди

$$K = \frac{15 \cdot 10^{-6}}{\sigma_1 + \sigma_2} = \frac{15 \cdot 10^{-6}}{0.8 \cdot 10^{-6} + 0.8 \cdot 10^{-6}} = 9.375$$

В итоге получаем следующую зависимость:

$$\alpha_{th,s}(P_n) = 1,15 \cdot 10^4 \cdot 370.47 \left(\frac{P_n^2}{215 \cdot 123000} \frac{557.718}{1356.55} \cdot 9.375^2 \right)^{0,302} =$$

$$= 7.218 \cdot 10^4 \cdot \left(P_n^2 \right)^{0.302}$$

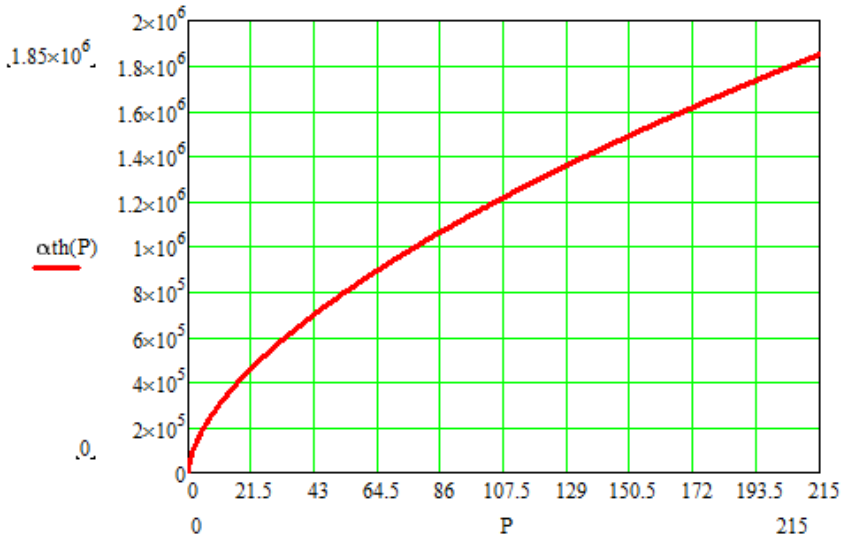

Рис. 6. Зависимость тепловой проводимости контакта от контактного давления

Рассчитанное значение тепловой проводимости контакта в дальнейшем используется для расчета скорости охлаждения отливки.

Заключение

Полученное значения коэффициента тепловой проводимости достаточно высоко и может обеспечить высокую скорость охлаждения отливки, достаточную для образования аморфной структуры по всему сечению отливки. Приведенная в работе модель интенсивного охлаждения может быть использована для разработки технологических процессов получения фасонных отливок 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.: Металлургия, 1987. – 328 с.
2. A. Inoue. Stabilization of Metallic Supercooled Liquid and Bulk Amorphous Alloys. Acta mater. 48 (2000).: 279-306.
3. Контактное термическое сопротивление. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. М.: Энергия, 1977. – 328 с.
4. Г. Карслоу, Д. Егер. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука.- 1964. - 488с.
5. Коротченко А.Ю., Поляков С., Баст Ю., Фокин Ю.О., Пастухов Л.В. «Режимы охлаждения, обеспечивающие получение отливок с аморфной структурой»//Литейное производство.2013. №1, С.31-36.
6. Луканин В.Н., Шатров М.Г., Камфер Г.М. и др. Теплотехника: Учебн. Для вузов. М.: Высшая школа, 1999.-671 с.
7. Michiaki Yamasaki, Shinya Kagao, Yoshihito Kawamura. Thermal diffusivity and conductivity of Zr55Al10Ni5Cu30 bulk metallic glass. Scripta Materialia 53 (2005) 63–67.
8. K.Q.Qiu and Y.I. Ren. Melt Infiltration Castingof Zr57Al10Nb5Cu15.4Ni12.6. J. of Minerals & Mazerials Charakterization. 2004, Vol. 3. No 2., pp 119-133
9. Меснянкин С.Ю., Викулов А.Г., Викулов Д.Г. «Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твердых тел»// Успехи физических наук. 2009. Т. 179. №9. С. 945.