

УДК 621.74.045

О. А. Яковышин (ФТИМС НАНУ)

## Формирование распределенных областей формы из сыпучего наполнителя в условиях литья по газифицируемым моделям

Одной из отличительных особенностей технологии литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) от существующих литейных схем производства отливок является возможность получения деталей в форме из сухого несвязанного наполнителя, что позволяет расширить применение процесса в аспекте повышения производительности труда и качества получаемого литья с одновременным снижением материало- и трудоемкости процесса. Фундаментальные исследования [1-3], посвященные определению достаточных и необходимых условий устойчивости формы, базируются на допущении о наполнителе как исключительно сыпучем теле. В то же время известно, что при заливке расплава в форму полимерная модель разрушается с выделением жидкой (ЖФ), парогазообразной (ПГФ) и твердой (ТФ) фаз продуктов термодеструкции, оказывающих влияние на качество поверхности отливки, ее физико-механические свойства и условия образования прочности формы [1-5]. Физическая и математическая модели формирования газового режима и противодействия в форме с ГМ на базе представлений о различных характерах движения металла освещены в работах [1-6]. Парогазообразные продукты деструкции под действием потока расплава и формирующегося градиента давлений в зазоре «расплав-модель» и форме на этапе заливки расплава и его охлаждения фильтруются сквозь поры огнеупорного покрытия и формовочного материала. Ввиду того, что скорость фильтрации ПГФ на несколько порядков превышает скорость прогрева формы [7], по мере прохождения ее холодных слоев, охлаждаясь, парогазообразные продукты накапливаются на зернах формовочного материала с образованием конденсированной жидкой фазы (КЖФ), создающей дополнительное препятствие для направленного движения газов. Продвижение ЖФ сквозь поры огнеупорного наполнителя также сопровождается постепенным ее

Предложена физическая модель временного распределения жидкой фазы и конденсированной парогазовой фазы продуктов термодеструкции полимерной модели в объеме формы из сыпучего наполнителя. Экспериментально показано создание условия для формирования различной скорости изменения термонапряженного состояния формы из сыпучего наполнителя. Получены численные значения силы взаимодействия стеклующейся жидкой фазы продуктов термодеструкции модели и кварцевого зерна наполнителя формы

охлаждением с одновременным переходом из вязкотекучего состояния в стеклообразное, когда при данной температуре дальнейшее ее продвижение становится невозможным. Исходя из этого можно предложить следующую физическую модель распределения ЖФ и КЖФ в объеме сыпучего наполнителя формы (рис. 1). В момент времени  $t_1$ , соответствующий начальному этапу фильтрационного движения продуктов термодеструкции на данном горизонте формы, летучие продукты термодеструкции модели устремляются вглубь формы, где происходит их постепенное охлаждение и выпадение на зернах наполнителя в виде конденсата. Одновременно в том же направлении движется смещенная на контактную поверхность «расплав-форма» ЖФ. Охлаждение ЖФ происходит в области, располагающейся в непосредственной близости от стенки отливки. Данную область можно назвать областью скрепления, поскольку располагающиеся в ней частицы наполнителя формы прочно соединены перешедшей в стеклообразное состояние ЖФ. Причем процесс перехода ЖФ в стеклообразное состояние проходит не одновременно, а в течение определенного промежутка времени, характеризующегося переходом вначале из вязкотекучего состояния в высокоэластичное и затем – в стеклообразное. КЖФ располагается в области, которую предлагается назвать областью связности – в ней частицы наполнителя связаны КЖФ, которая при охлаждении не переходит в стеклообразное состояние, поскольку парогазовые продукты разложения пенополистирола в условиях литейной формы представляют собой преимущественно мономер и

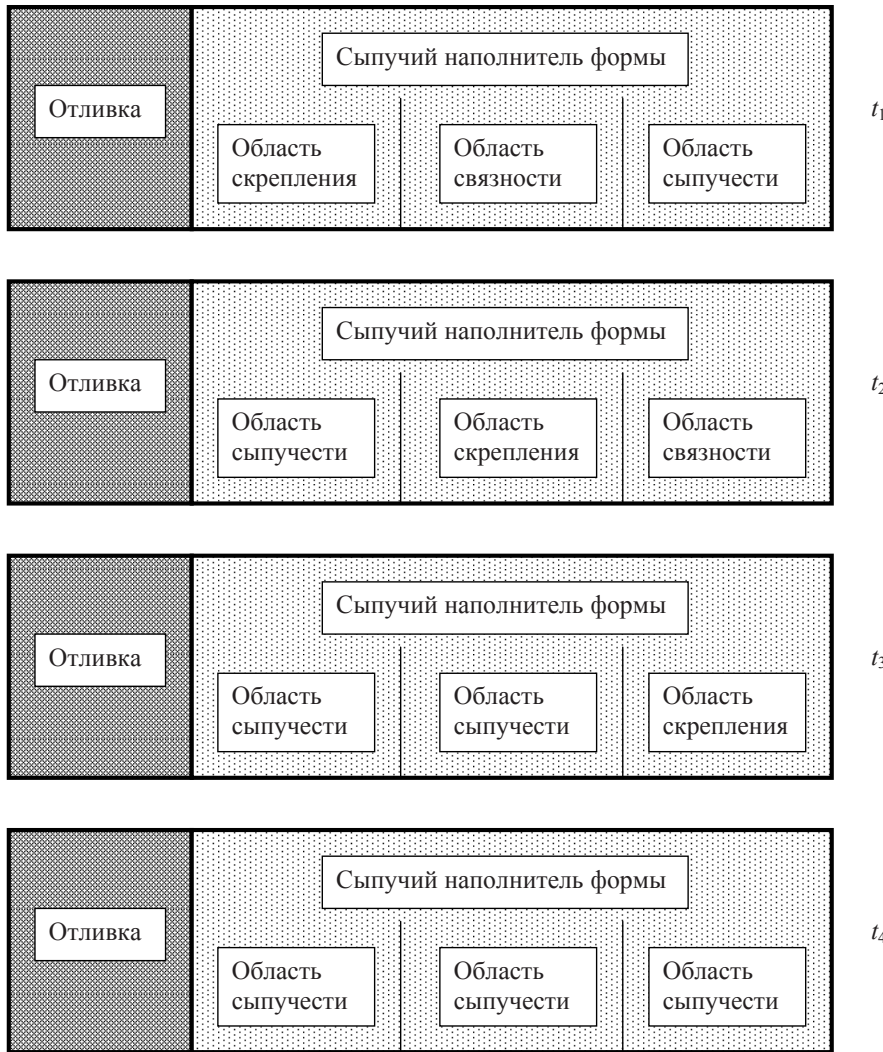


Рис. 1. Распределение областей формы из сыпучего наполнителя с течением времени ( $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$ )

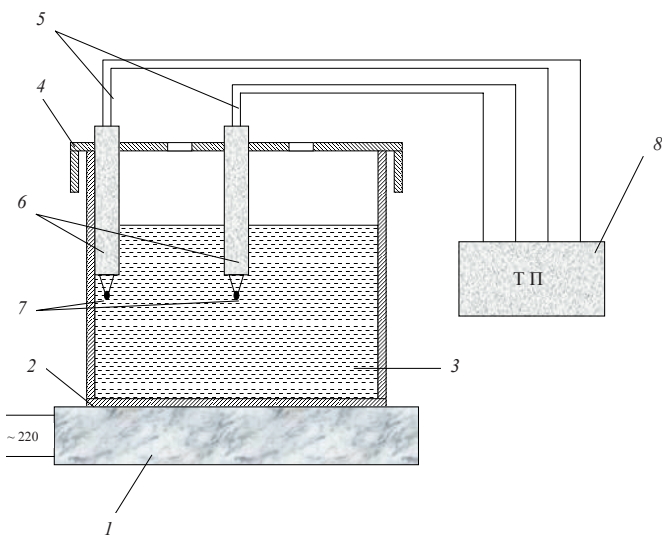


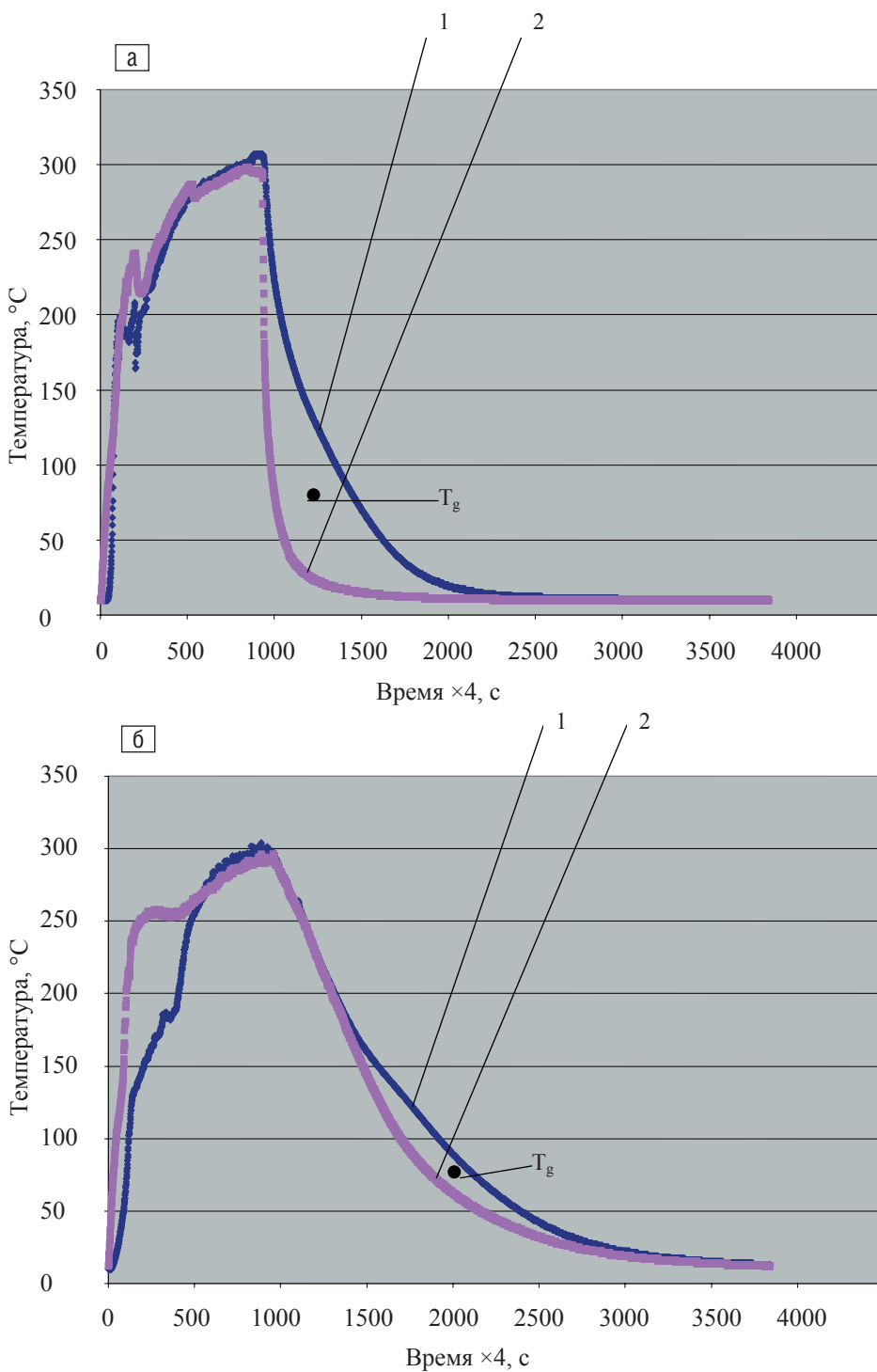
Рис. 2. Схема установки для определения температуры стеклования аморфного полимера: 1 – нагреватель; 2 – емкость; 3 – жидкая фаза продуктов термодеструкции газифицируемой модели; 4 – кронштейн; 5 – холодные концы термопар; 6 – алундовые соломки; 7 – горячие спаи термопар; 8 – прибор для регистрации и записи значений температуры

олигомеры. За областью связности расположена область сыпучести, в которой в данный момент времени отсутствуют ЖФ и КЖФ. К моменту времени  $t_2$  глубина прогрева формы возрастает, ЖФ переходит из стеклообразного состояния в высокоэластичное, а затем – в вязкотекучее, и продвигается далее от отливки. КЖФ с повышением температуры переходит в парогазообразное состояние и также продвигается в глубинные слои формы. Логично предположить, что с течением времени размеры областей будут изменяться, пока к определенному моменту времени  $t_4$  области скрепления и связности не перестанут существовать. Необходимо также обратить внимание на то обстоятельство, что распределение области скрепления по высоте формы может носить неравномерный характер, поскольку количество вытесняемой на контактную поверхность «расплав-форма» ЖФ в значительной степени зависит от большого числа технологических факторов: конфигурации модели, температуры расплава, скорости его поступления в форму и т. д. К вышеизложенному следует добавить установленный факт уменьшения

объема ЖФ в процессе ее охлаждения [8], что наряду с известным положением о хорошей смачиваемости ЖФ зерен огнеупорного наполнителя (кварцевого песка) формы может быть использовано для анализа происходящих в данном случае процессов. Обволакивая частицы огнеупорного наполнителя, ЖФ обеспечивает их прочное скрепление, сопровождающееся при изменении температуры образованием напряженного состояния данной области формы. Из литературных источников известно, что переход полистирола из стеклообразного в высокоэластическое состояние проходит при температуре стеклования  $T_g = 80$  °С. Указанное значение приведено для широко применяемого литейного полистирола, хотя известно, что у линейных полимеров, каким является полистирол,  $T_g$  повышается с увеличением молекулярной массы. Так,  $T_g$  полистирола с молекулярной массой  $\overline{M}_n$  3000 равна 43 °С, тогда как при  $\overline{M}_n$  300000 температура стеклования уже 99 °С, что обусловлено вкладом в молекулярную подвижность сегментов, находящихся на концах полимерной цепи [9]. Однако, следует отметить, что ЖФ не является

собственно полистиролом, а представляет собой продукт разложения внутримолекулярного строения указанного полимера, имеющий отличную от исходного вещества структуру. Необходимость установления значения такого важного параметра как температура стеклования  $T_g$  имеет очень важное практическое значение. Температура стеклования характеризует физико-механические свойства полимера, и, следо-

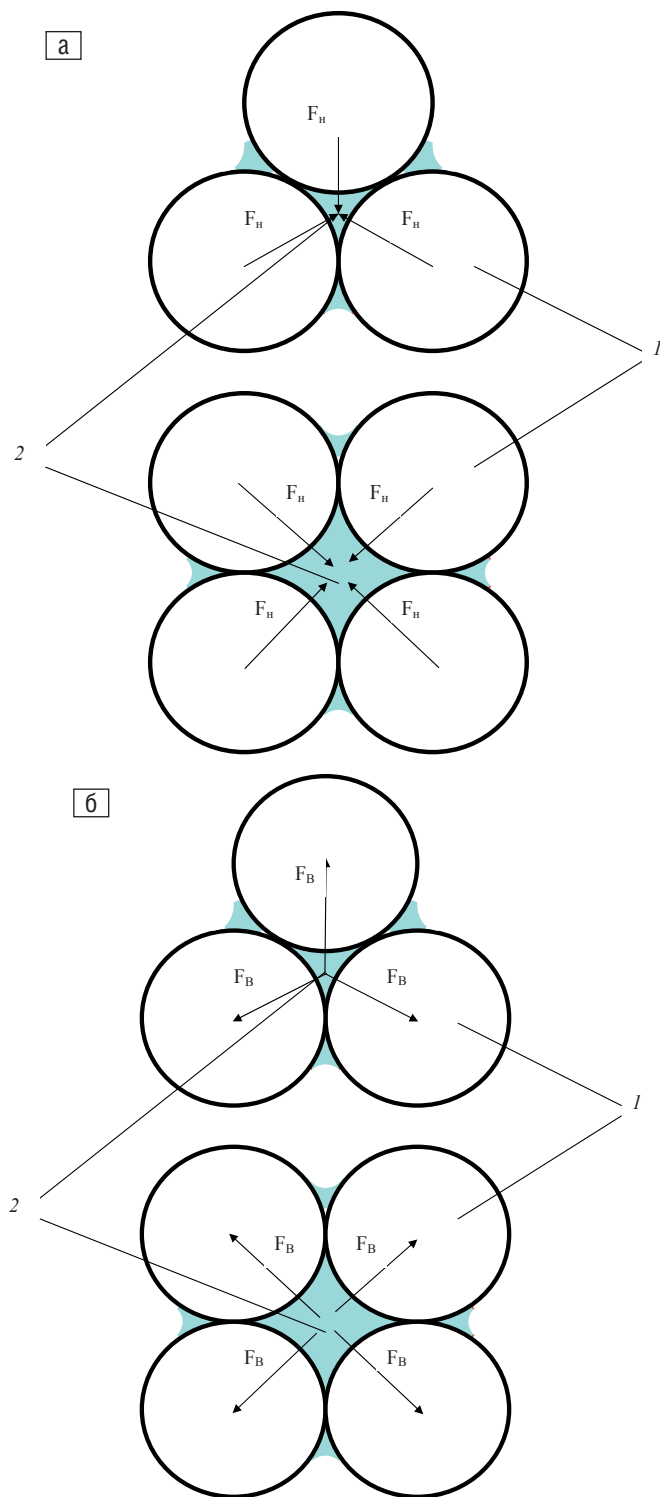
вательно, влияет на условия прохождения процесса его взаимодействия с наполнителем литейной формы. Поэтому вопрос о значении температуры перехода расплава ЖФ из вязкотекучего в стеклообразное состояние требует дополнительного изучения. В настоящее время область исследования высокомолекулярных веществ обладает достаточно широким спектром экспериментальных методов определения  $T_g$ , которые можно выделить в две основные груп-



**Рис. 3.** Определение температуры стеклования жидкой фазы продуктов термодеструкции пенополистироловой модели при нагреве и быстром охлаждении: 1 – термопара, расположенная в геометрическом центре образца ЖФ; 2 – термопара, расположенная на поверхности образца ЖФ (а); при нагреве и медленном охлаждении: 1 – термопара, расположенная в геометрическом центре образца ЖФ; 2 – термопара, расположенная на поверхности образца ЖФ (б)

пы: динамические методы и методы равновесного состояния [9]. Их объединяет требование наличия специализированного оборудования и необходимость предварительной подготовки полимерных образцов. В данной работе предложен (в порядке обсуждения) принципиально новый способ определения температуры стеклования аморфного полимера [10]. Для этого в металлическую емкость (рис. 2) с расположенными в ней двумя горячими спаями термопар, один из которых заведомо располагался в геометрическом центре исследуемого образца ЖФ, а другой – у его поверхности на том же уровне, заливали расплав ЖФ и давали ему остыть до комнатной температуры. Затем емкость устанавливали на нагревательный элемент, включали его и фиксировали температуру ЖФ с помощью прибора МИРТ-8 (разработка отдела автоматизации ФТИМС НАНУ). По достижении ЖФ температуры 300–310 °С, емкость с нагревательного элемента снимали и мгновенно погружали в воду с температурой 0 °С, продолжая непрерывно фиксировать значения температуры. Другая серия экспериментов проводилась в несколько измененном варианте: емкость устанавливалась на уже разогретый нагревательный элемент, а снижение температуры ЖФ после ее нагрева проводили ступенчато с помощью ЛАТ, регулирующего напряжение питания нагревательного элемента. Результаты измерений представлены на рис. 3, а, б. Полученные графи-

ческие зависимости позволяют проследить во времени процессы нагрева и охлаждения ЖФ. Повышение температуры образца в центральной его части происходит с некоторым запаздыванием по сравнению с температурой, фиксируемой на периферии, что



**Рис. 4.** Схема формирования напряженного состояния сыпучего наполнителя формы в условиях литья по газифицируемым моделям для различных схем укладки зерен на этапе стеклообразования жидкой фазы продуктов термодеструкции газифицируемой модели на зернах формовочного материала: 1 – зерно формовочного материала, 2 – жидкая фаза продуктов термодеструкции модели (а); при повторном прогреве охлажденной жидкой фазы продуктов термодеструкции газифицируемой модели: 1 – зерно формовочного материала, 2 – жидкая фаза продуктов термодеструкции модели (б)

объясняется различной скоростью прогрева, являющейся функцией диаметра образца полимера (при прочих одинаковых условиях). Чем больше диаметр образца, тем заметнее будет разность в скоростях изменения температур в фиксируемых точках. Однако для предлагаемого метода определения  $T_g$  размеры исследуемого образца не имеют принципиального значения. Характерное зигзагообразное изменение температур в диапазоне 170-250 °С можно объяснить захлаживающим эффектом опускающихся с поверхности алундовых соломок, в которых находятся термодеструкторы, объемов стеклообразной ЖФ, подтопленной горячей и уже находящейся в высоковязком состоянии ЖФ. С началом этапа охлаждения ЖФ уменьшение температур в фиксируемых точках носит экспоненциальный характер. Падение температуры на периферии происходит с большей скоростью, чем в центре, к тому же, при более интенсивном теплоотборе скорость падения температуры в центре образца (рис. 3, а) оказывается в 1,5-2,0 раза выше скорости падения температуры на периферии образца при медленном охлаждении (рис. 3, б). Однако и в том, и в другом случае кривые, характеризующие охлаждение полимерного образца, ограничивают область определенного размера, геометрическим центром которой и является точка, характеризующая температуру стеклования полимера.

Анализируя представленные графические материалы приходим к выводу, что с увеличением интенсивности теплоотбора значение температуры стеклования  $T_g$  ЖФ повышается. Так, если на рис. 3, б геометрический центр фигуры, ограниченной кривыми 1 и 2, отображающими этап охлаждения образца ЖФ находится в точке, которая отвечает температуре 76 °С, то на рис. 3, а геометрический центр фигуры расположен в точке, которая отвечает 80 °С. Установленные особенности ЖФ продуктов термодеструкции ГМ позволяют сделать предположение, что с изменением исходной температуры наполнителя формы создаются условия для формирования различной скорости изменения ее упрочняющего эффекта. Жидкостная манжета, образующаяся в результате скопления ЖФ в порах формовочного материала, по мере охлаждения уменьшается в объеме, в результате чего происходит формирование напряженного состояния системы «сыпучий наполнитель-ЖФ» в данной области формы (рис. 4, а), которое можно представить зависимостью

$$F_H = F_K + F_{CT}, \quad (1)$$

где  $F_H$  – сила взаимодействия ЖФ и песчинки наполнителя формы, Н;  $F_K$  – сила когезионной прочности манжеты ЖФ, Н;  $F_{CT}$  – сила воздействия стеклующейся ЖФ на песчинку наполнителя, Н.

Векторы возникающей силы  $F_H$  направлены от центров масс зерен формовочного материала к центру манжеты. С повышением температуры ЖФ ее объем



постепенно возрастает, что способствует созданию силы  $F_B$ , векторы которой устремлены от центра манжеты к центрам зерен формовочного материала, а величина равна силе воздействия ЖФ на песчинку наполнителя при переходе ее из стеклообразного в вязкотекучее состояние (рис. 4, б). Числовое значение силы  $F_H$  определяли на основании данных, полученных в результате экспериментальных исследований. Для исследования когезионной прочности ЖФ была сконструирована установка, изображенная на рис. 5, а, б и представляющая собой два кварцевых стекла 1 и 2, торцы которых имитировали поверхность кварцевых зерен, соединенные посредством тонкого слоя ЖФ 3. Стекло 1 с навитой на нем них-

ромовой спиралью 4 фиксировалось специальным держателем 5. К нижнему стеклу 2 прикрепляли груз 6. Пропуская по нихромовой спирали регулируемый ЛАТ 7 ток, добивались разной степени нагрева стекла 1, передающего тепловую энергию слою ЖФ, толщину которого выбирали равной величине порового пространства, окружающего кварцевое зерно в форме. В момент отрыва нижнего стекла 2 с грузом 6 от стекла 1 фиксировали значение температуры, которую контролировали ХА термпарой, подключенной посредством компенсационных проводов к измерительному прибору УПИТ (разработка отдела автоматизации ФТИМС НАНУ). Величину когезионной прочности пленки ЖФ можно определить в соответствии с формулой

$$\sigma_k = \frac{P}{S}, \quad (2)$$

где  $P$  – сила тяжести, действующая на стекло 2 с грузом, Н;  $S$  – площадь контакта кварцевых стекол, м<sup>2</sup>.

Силу тяжести определяли по известному соотношению

$$P = m \cdot g, \quad (3)$$

где  $m$  – масса стекла 2 и груза 6, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, Н/кг.

Нижнее стекло 2 отрывается от верхнего стекла 1 при условии  $P > F_k$ .

Полученные экспериментальные данные соотносили со значениями площади поверхности кварцевого зерна фракции 0,2 мм как одной из наиболее ходовых фракций при формовке для технологии ЛГМ-процесса.

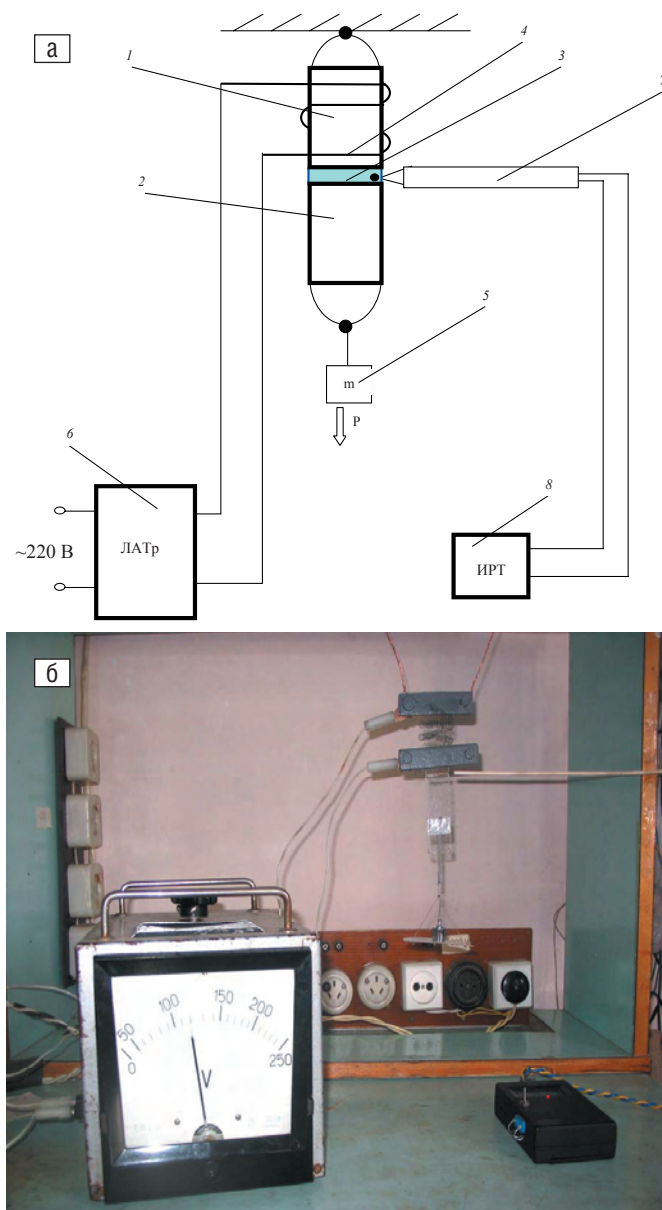
Значение силы  $F_{CT}$  определяли исходя из оценки зависимости изменения объема ЖФ от температуры и рассчитывали по формуле

$$F_{CT} = P_{\phi} (S_{ЖФ} - S_{ЖФСТ}), \quad (4)$$

где  $P_{\phi}$  – давление газовой среды, Н/м<sup>2</sup>;  $S_{ЖФ}$  – площадь поверхности образца ЖФ, находящейся в высокоэластическом состоянии, м<sup>2</sup>;  $S_{ЖФСТ}$  – площадь поверхности образца застекловывшейся ЖФ, м<sup>2</sup>.

Графическая зависимость  $F_H$  (для зерна фракции 0,2 мм) от температуры, полученная на основе экспериментальных данных и аналитических зависимостей, представлена на рис. 6.

Поскольку экспериментальные исследования образцов упрочненного формовочного материала (кварцевого песка) из областей скрепления и связности представляют трудности, оценочное определение величин прочностей указанных областей производили аналитически. Определение значения  $\sigma_{СК}$  базировалось на значении определенного  $\sigma_k$ , приведенного к площади контакта кварцевого зерна с манжетой ЖФ. Для установления величины  $\sigma_{СВ}$  опирались на значения поверхностного натяжения стирола, толуола, изопентана, бензола [11, 12] как основных парогазовых продуктов разложения моде-



**Рис. 5.** Установка для проведения экспериментальных работ по определению когезионной прочности жидкой фазы продуктов термодеструкции газифицируемой модели (методика исследований): 1 – верхнее кварцевое стекло; 2 – нижнее кварцевое стекло; 3 – жидкая фаза продуктов термодеструкции пенополистироловой модели; 4 – нихромовая спираль; 5 – груз; 6 – лабораторный автотрансформатор; 7 – термопара; 8 – измеритель-регистратор температуры (а); внешний вид установки (б)

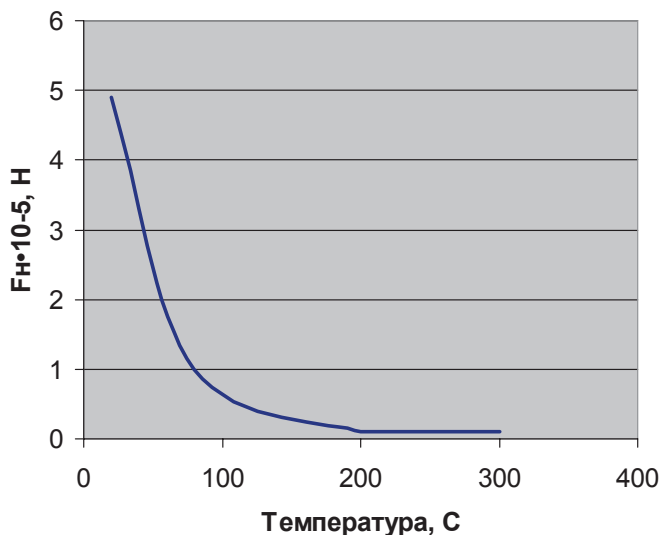
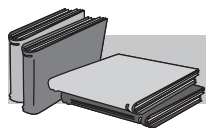


Рис. 6. Графическая зависимость от температуры

ли. Следует подчеркнуть, что полученные величины носят оценочный характер, к тому же изменяются с температурой.  $\sigma_{СК} = 27472,5 \text{ Н/м}^2$  ( $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ),  $\sigma_{СВ} = 155,9 \text{ Н/м}^2$  ( $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Полученные данные позволяют внести дополнение в математическую модель процесса ЛГМ [1-4], касающееся сохранения статического положения области «металл-форма» с учетом прочности образующихся областей скрепления  $\sigma_{СК}$  и связности  $\sigma_{СВ}$ , которое в общем виде можно записать следующим образом:



## ЛИТЕРАТУРА

1. Литье по газифицируемым моделям / Под ред. Ю. А. Степанова. – М.: Машиностроение, 1976. – 224 с.
2. Озеров В. А., Шуляк В. С., Плотников Г. А. Литье по моделям из пенополистирола. – М.: Машиностроение, 1970. – 183 с.
3. Шуляк В. С., Рыбаков С. А., Григорян К. А. Производство отливок по газифицируемым моделям. – М.: МГИУ, 2001. – 330 с.
4. Шуляк В. С. Литье по газифицируемым моделям. – СПб.: НПО «Профессионал», 2007. – 408 с.
5. Шинский О. И. Газогидродинамика и технологии литья железоуглеродистых и цветных сплавов по газифицируемым моделям. Дис. ... докт. техн. наук, Киев. – 1997. – 481 с.
6. Серебро В. С. Основы теории газовых процессов. – М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.
7. Коган Э. А., Серебро В. С. Моделирование газового режима формы с газифицируемой моделью при вакуумировании. – Одесса.: НИИСЛ, 1987. – 13 с.
8. Яковышин О. А., Шинский О. И., Зинченко В. Д. Особенности термодеструкции пенополистироловой модели в литейной форме // Процессы литья. – 2007. – № 6. – с. 65-71.
9. Рабек Я. Экспериментальные методы в химии полимеров: В 2-х частях. Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 864 с.
10. Пат. 34602 Україна, МПК G01N 25/20. Спосіб визначення температури склування аморфних полімерів / О. А. Яковышин. – Опубл. 11.08.2008, Бюл. № 15.
11. Справочник химика. Общие сведения, строение вещества, физические свойства важнейших веществ, краткие сведения по лабораторной технике. – Л.: Химия, 1971. – Т. 1. – 1072 с.
12. Малкин А. Я., Вольфсон С. А., Кулезнев В. Н., Файдель Г. И. Полистирол. – М.: Химия, 1975. – 288 с.

$$\gamma Z \cdot \text{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \leq P_\phi + \gamma_M X + \sigma_{СК} + \sigma_{СВ} \leq \gamma Z \cdot \text{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right), \quad (5)$$

где  $\gamma$  – плотность сыпучего наполнителя формы, кг/м<sup>3</sup>;  $Z$  – высота столба сыпучего наполнителя на исследуемом горизонте формы, м;  $\phi$  – угол внутреннего трения;  $P_\phi$  – противодавление парогазовой фазы продуктов термодеструкции ГМ;  $\gamma_M$  – плотность заливаемого в форму металла, кг/м<sup>3</sup>;  $X$  – высота столба залитого в форму металла, м;  $\sigma_{СК}$  – прочность упрочненной области скрепления, Н/м<sup>2</sup>;  $\sigma_{СВ}$  – прочность упрочненной области связности, Н/м<sup>2</sup>.

### Вывод

В результате проведенной работы установлено различие и разделены понятия «жидкая фаза» и «конденсированная парогазовая фаза» продуктов термодеструкции газифицируемой модели, на основании чего предложена физическая модель временного распределения жидкой фазы и конденсированной парогазовой фазы продуктов термодеструкции модели в объеме формы из сыпучего наполнителя. Экспериментально показано влияние температуры на создание условия формирования различной скорости изменения термонапряженного состояния формы из сыпучего наполнителя. Получены численные значения силы взаимодействия стеклующейся жидкой фазы продуктов термодеструкции модели и кварцевого зерна наполнителя формы.

### Ключевые слова

Литье по газифицируемым моделям, сыпучий наполнитель формы, продукты термодеструкции, газифицируемая модель, термонапряженное состояние форм

## Summary

O. A. Iakovyshyn

### Forming of the distributed regions of mould from granular filler in the conditions of Lost-Foam casting

The physical model of the temporal distributing of liquid phase and condensed steam-and-gas phase of products of thermal destruction polymeric model in the volume of mould from granular filler is offered. Creation of condition for forming of a different speed of change of the temperature stress state mould from granular filler is experimentally shown. The numeral values of force of cooperation of vitrescent liquid phase of products of thermal destruction model and quartz grain of filler of mould are production

## Анотація

О. А. Яковишин

### Формування розподілених областей форми із сипучого наповнювача в умовах лиття за моделями, що газифікуються

Запропоновано фізичну модель тимчасового розподілу рідкої фази і конденсованої парогазової фази продуктів термодеструкції полімерної моделі в об'ємі форми із сипучого наповнювача. Експериментально показано створення умов для формування різної швидкості зміни термонапруженого стану форми із сипучого наповнювача. Отримані числові значення сили взаємодії рідкої фази, що переходить у склоподібний стан, продуктів термодеструкції моделі і кварцевого зерна наповнювача форми

УДК 621.744.072.2

В. С. Дорошенко, И. О. Шинский (ФТИМС НАНУ)

## 3D - технологии при литье по газифицируемым моделям

Сегодня именно в науке усматривают путь спасения национальной экономики от последствий глобального кризиса. Президент Украины В. А. Ющенко на международном инвестиционном саммите в октябре 2008 г. в г. Донецке заявил, что государство намерено перенаправить отечественные экспортно-ориентированные отрасли на внутренний рынок, поставив задачу формирования эффективного спроса на внутреннем рынке на продукцию металлургии. Строительство и машиностроение как потребители металла – это сейчас те две отрасли, которые определяют развитие страны и которые остро нуждаются во внедрении металлоемких, энергосберегающих технологий по выпуску наукоемкой продукции. На саммите наибольшую популярность имели именно такие проекты в области инновационных технологий.

Отечественные металлообработка и машиностроение в условиях системной интеграции в мировую экономику нашей страны как полноправного члена ВТО с появлением избытка недорогого металла получают дополнительный стимул перехода от неглубокой переработки и экспорта изделий металлургии к выпуску наукоемкой продукции (машин, механизмов, станков, приборов и инструмента). Это является

Рассмотрен ряд новых достижений совершенствования технологии литья по газифицируемым моделям, в частности, опыт применения станков с ЧПУ для быстрого изготовления моделей отливок и пресс-форм

несомненным вызовом отечественным ученым и инженерам, достойный ответ на который позволит полнее реализовать то преимущество, что Украина относится к немногочисленным странам с замкнутым металлургическим циклом производства металлов из собственных руд. В частности, в области литейного производства отечественная инженерная наука обладает технологиями, относящимися к наукоемким высоким технологиям, к которым вполне можно отнести современные разновидности литья по газифицируемым моделям (ЛГМ, в англоязычной версии Lost Foam Process) и которые вопреки сложившемуся стереотипу свидетельствуют, что высокие технологии – это не обязательно сложные малодоступные процессы.

В машиностроении Украины при появлении за годы независимости на месте крупных производств множества не крупных самостоятельных предприятий, при характерных для них малосерийностью и многономенклатурностью продукции, гибкость технологии литейного производства в сочетании с невысокими капитальными затратами на внедрение и высокой точностью выпускаемых заготовок