

УДК 678.02

М. М. Ревяко, профессор (БГТУ); Е. З. Хрол, аспирант (БГТУ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МОДИФИЦИРОВАННОГО ДВУСТАДИЙНОГО РОТАЦИОННОГО ФОРМОВАНИЯ

В статье приведены основные принципы и подходы к решению задачи теплопереноса при ротационном формовании. Особое внимание уделено процессу теплопередачи в течение стадии нагревания. Представлена рассчитанная зависимость, с помощью которой можно определить время изготовления классическим одностадийным методом ротационного формования изделия с заданной толщиной стенки. Кроме того, представлены альтернативные способы решения подобных задач и результаты решения, полученные за счет использования подобных альтернативных способов. Представлены основные принципы модифицированного двухстадийного процесса ротационного формования. Подход, использованный для решения задачи теплопереноса при одностадийном ротационном формовании, применен для случая двухстадийного формования. Результаты моделирования процесса модифицированного двухстадийного ротационного формования проверены на практике.

The main principles and approaches for decision the problem of heat transfer during the rotational molding are resulted in the article. The special attention is given to the process of a heat transfer during the heating stage. The calculated dependence which makes it possible to define molding time of a classical one-step method of rotational molding of a product with the set thickness of a wall is presented in the article. Besides, alternative ways of the decision of similar problems and the results of the decision with the use of similar alternative ways are presented too. Main principles of the modified two-step rotational molding process are presented there. The approach used for the decision of a heat transfer problem for the one-step rotational molding, is applied to a case of two-step molding. Results of the modeling of the modified two-step rotational molding process are tested in practice.

Введение. Ротационное формование представляет собой процесс производства крупногабаритных полых пластмассовых изделий. Подобные изделия в некоторых случаях могут формоваться и другими методами, например, литьем под давлением или раздувным формованием [1]. Но в сравнении с вышеупомянутыми методами ротационное формование имеет определенные преимущества – относительно низкий уровень остаточных напряжений в отформованном изделии и невысокую стоимость формирующего инструмента. Ротационное формование широко используется в качестве метода формования таких изделий, как контейнеры, резервуары, но оно может также использоваться для изготовления сложных медицинских изделий и игрушек.

Цикл процесса ротационного формования состоит из четырех основных стадий: загрузка полимерного материала в форму, формование (сплавнение), охлаждение и извлечение готового изделия из формы [2]. Цель второй стадии ротационного формования состоит в поднятии температуры полимера до величины, при которой частицы порошка смогут сплавляться (или спекаться), образуя монолитный жидкий слой, приклеивающийся к стенке формы. В большинстве случаев ротационного формования в процессе используется порошкообразный материал, который вводится в полую металлическую форму при комнатной температуре. Затем форма с материалом по-

мещается в газообразную среду, которая имеет такую высокую температуру, что металлическая форма и порошок начинают нагреваться до необходимых температур.

Таким образом, стадия сплавления является основной стадией ротационного формования, а процесс переноса тепла является определяющим фактором стадии сплавления. Изучение процесса теплопередачи при ротационном формовании имеет существенное значение для понимания кинетики всего процесса ротационного формования в целом.

Основная часть. Теплопередача в течение цикла ротационного формования может осуществляться различными способами: конвекцией, теплопередачей, излучением. В большинстве процессов ротационного формования в качестве греющего агента используется какая-либо подвижная среда (топочные газы, горячий воздух), таким образом, основным механизмом передачи тепла при ротационном формовании является конвекция.

Конвекция в процессе ротационного формования осуществляется в нестационарном режиме, таким образом, наличие такой нестационарной системы существенно затрудняет моделирование и расчет теплопередачи при ротационном формовании [3].

Формы для ротационного формования традиционно изготавливаются из относительно тонких, с высокой теплопроводностью металлов, таких как алюминий и стали. Как правило,

форма поглощает и переносит существенно больше энергии, чем пластмасса. Поскольку форма нагревается при почти постоянной температуре воздуха окружающей среды, скорость ее нагрева практически не зависит от количества приемников тепла внутри формы, т. е. от количества материала. В результате изменение температуры формы должно подчиняться зависимости первого порядка. Математически это описывается уравнением теплопроводности:

$$\rho \cdot C_m \cdot h \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot (T_{\text{возд}} - T), \quad (1)$$

где ρ – плотность материала формы, кг/м³; C_m – его удельная теплоемкость, Дж/(кг · °С); h – толщина стенки формы, м; T – ее мгновенная температура, °С; t – время, с; α – коэффициент теплопередачи при конвекции (коэффициент теплоотдачи), Вт/(м² · град); $T_{\text{возд}}$ – температура окружающей среды, °С. В зависимости предполагается, что температура вдоль толщины стенки формы является постоянной и что коэффициент теплопередачи с обеих сторон стенки формы также одинаков.

Расчет теплопереноса затрудняется вращением оснастки в течение цикла ротационного формования. Порошок полимерного материала, находящийся внутри формы, контактирует не со всей ее поверхностью, а лишь с ее частью. Необходимо также учитывать и сложность механизма процесса сплавления и системы сил, действующих на полимерные частицы в течение цикла формования.

Ранее были проведены расчеты и моделирование процесса теплопередачи в течение ротационного формования [3]. В результате исследований была получена математическая зависимость следующего вида:

$$t = \frac{C_m \cdot \delta_m \cdot \rho_m \cdot (T_{\text{мн}} - T_{\text{мк}})}{K \cdot \Delta T_{\text{ср}}}, \quad (2)$$

где C_m – удельная теплоемкость полимера ($C_m = 1,70$ кДж/(кг · град)); δ_m – толщина слоя материала (толщина стенки отформованного изделия), м; ρ_m – плотность полимера, кг/м³ (для полиэтилена $\rho_m = 900$ кг/м³); $T_{\text{мн}}$, $T_{\text{мк}}$ – начальная и конечная температура материала, град; K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м² · град); $\Delta T_{\text{ср}}$ – средняя разность температур, град.

Такая зависимость (математическая модель), которая позволяет рассчитать время формования изделия заданной толщины, была выведена в результате принятия ряда допущений. Одно из основных допущений – постоянство значений коэффициента теплопередачи в течение всего цикла теплопереноса. В действительности значение коэффициента теплопере-

дачи K является не постоянным, оно меняется с течением времени.

Сложность расчета процесса по уравнению (2) состоит в том, что слой материала на поверхности формы постоянно увеличивается ($\delta_m \neq \text{const}$), а, следовательно, увеличивается общее термическое сопротивление и, как следствие, уменьшается коэффициент теплопередачи ($K \neq \text{const}$). Результаты расчета времени формования по аналитической зависимости (2) хорошо согласуются со значениями времени, используемыми на практике. Разница этих величин составляет 5–10%, что для большинства инженерных расчетов является удовлетворительным. Такая зависимость имеет преимущество, которое заключается в возможности быстрого определения времени формования без существенных затрат средств и усилий.

Однако аналитическая зависимость (2) является приближенной, т. к. она не учитывает изменение коэффициента теплопередачи и температуры материала в течение формования. Получение аналитическим способом зависимости, которая бы учитывала эти изменения, является весьма затруднительным. Для решения этой задачи был проведен расчет времени формования численным методом с использованием ЭВМ и пакета MatLab. При этом для расчета использовалась та же зависимость (2). Результаты решения аналогичной задачи численным методом были представлены в виде графических зависимостей [3]. Разница рассчитанных таким образом значений от реально используемых на практике значений также составляет ~ 5–10%.

С другой стороны, для систем такого типа применимо дифференциальное уравнение теплопроводности (при отсутствии внутренних источников тепла):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

где a – коэффициент температуропроводности; x, y, z – координаты.

Форма находится в постоянном вращении, поэтому тепло передается только в одном направлении – перпендикулярно поверхности формы и внутрь ее. Уравнение (3) можно представить в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (4)$$

Принимая во внимание начальные условия, данное уравнение наиболее просто решается с использованием приближенного численного метода сеток на ЭВМ с использованием пакета MatLab. Результаты расчета численным методом для случаев формования в стальной и алю-

миниевой форме представлены на рис. 1 и 2, соответственно.

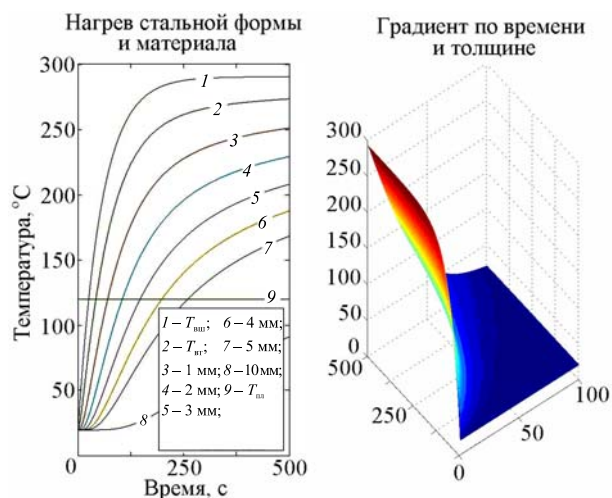


Рис. 1. Моделирование процесса теплопередачи в течение цикла ротационного формования при использовании дифференциального уравнения теплопроводности (стальная форма)

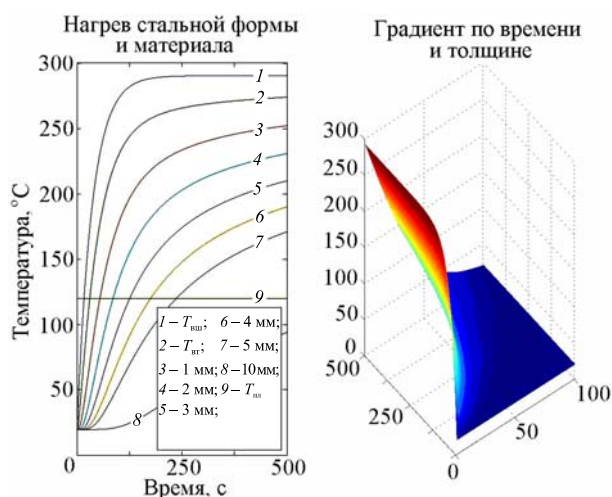


Рис. 2. Моделирование процесса теплопередачи в течение цикла ротационного формования при использовании дифференциального уравнения теплопроводности (алюминиевая форма)

При расчете времени формования по дифференциальному уравнению теплопроводности результаты отличаются от используемых на практике значений на 3–6%, что несколько точнее, чем в ранее рассмотренных методах.

Таким образом, в инженерных расчетах в большинстве случаев применение приближенного уравнения (2) для определения времени формования является оптимальным, т. к. решение его не представляет сложности, а результат с высокой точностью соответствует значению, используемому на практике.

На следующем этапе работы была поставлена цель определения математической зави-

симости для нахождения времени формования изделия заданной толщины для случая модифицированного двухстадийного процесса ротационного формования [4].

При таком процессе полимерные порошки последовательно добавляются в полость формы. На первом этапе процесса в полость формы добавляется материал внешнего коркового слоя, после чего происходит первая стадия формования. Затем форма извлекается из печи, в горячей форме открывается люк, после чего в нее добавляется вторая порция материала внутреннего слоя. После этого форма закрывается и осуществляется вторая стадия формования. Далее процесс ротационного формования осуществляется аналогично классической схеме. Следует отметить, что на двух различных стадиях формования можно использовать как полимерные материалы различной природы, так и полимеры с одинаковой полимерной матрицей, но отличающиеся составом композиции (например, один слой полимера может вспениваться, а другой слой может быть монолитным).

Решение вопроса теплопроводности в таком случае осложняется, помимо общих проблем ротационного формования, наличием нескольких этапов формования, которые необходимо учесть. Это еще более усложняет решение и делает практически невозможным вывод аналитической зависимости. Таким образом, единственным возможным вариантом решения подобной задачи является случай использования дифференциального уравнения теплопроводности и численного метода решения этого уравнения. Путем соответствующих изменений программы получаем для случая модифицированного процесса ротационного формования следующую зависимость (рис. 3). При решении предполагается, что используемый на каждой стадии полимерный материал имеет одинаковую плотность и удельную теплоемкость, а слои имеют одинаковую толщину.

Получение изделий методом модифицированного двухстадийного ротационного формования было осуществлено на практике на ОАО «Борисовский завод пластмассовых изделий». На заводе было осуществлено формование двух видов двухслойных изделий:

1. Внешний слой стенки изделия является монолитным, а внутренний слой является вспененным. Получение такого изделия позволяет сократить массу изделия и увеличить толщину его стенки.

2. Изделие имеет внешний слой стенки из чистого материала, внутренняя стенка также изготовлена из чистого полимера, а внутри стенки присутствует слой с армирующими стеклянными волокнами.

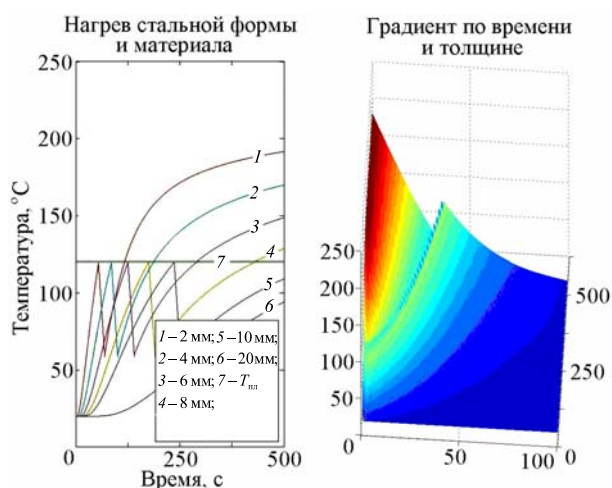


Рис. 3. Моделирование процесса теплопередачи в течение цикла модифицированного двухстадийного ротационного формования при использовании дифференциального уравнения теплопроводности (алюминиевая форма)

Для определения изменения характеристик модифицированных готовых изделий по сравнению с немодифицированными из изделий были вырублены образцы стандартных размеров. В результате испытаний было выявлено, что прочность изделий, полученных при использовании композиций со стекловолокном по двухстадийному процессу, выше значения прочности изделий из чистого полимера приблизительно на 15–20%. Полученное изделие со вспененной структурой при сохранении массы обладает существенно большей стенкой (на 40–50%), что также увеличивает и прочностные характеристики готового изделия (прочность при растяжении увеличивается до 10%). Изделие имеет два слоя: наружный – монолитный, корковый, и внутренний – вспененный. На микроскопическом снимке разреза стенки изделия хорошо просматривается однородность вспенивания [5].

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при использовании модифицированного двухстадийного ротационного формования изделий возможно улучшение прочностных характеристик изделия, что обеспечит более длительную его эксплуатацию в реальных условиях без разрушения. Такой процесс приводит к значительному экономическому эффекту и к повышению конкурентоспособности выпускаемых изделий.

Определение параметров формования таких изделий осуществлялось с использованием полученной модели формования для модифицированного двухстадийного процесса ротационного формования. Вычисленные значения с незначительной корректировкой позволили осуществить формование качественных изделий. Таким образом, разработанная модель позволя-

ет рассчитывать время формования модифицированных изделий методом модифицированного двухстадийного ротационного формования и описать кинетику такого процесса, что позволяет теоретически обосновывать технологические режимы формования тех или иных изделий, понимать кинетику процесса формования.

Заключение. В результате расчетов была получена зависимость, которая позволяет рассчитывать время формования изделия методом модифицированного двухстадийного ротационного формования. Такой подход к расчету является достаточно точным, и, как было показано ранее, ошибка такого метода расчета составляет 3–6%. Такая точность позволяет получать результаты, которые при незначительной корректировке можно использовать для практических целей.

В результате работы были получены модифицированные изделия, свойства которых превосходят свойства изделий из немодифицированного материала. Такие изделия, обладающие улучшенными характеристиками, способны дольше использоваться в реальных условиях эксплуатации, а также обладают рядом новых характеристик, таких как легкость, стойкость к действию УФ-излучения и т. д. Кроме того, такие изделия можно изготовить при использовании меньшего количества полимерного материала, а это приводит к значительной экономии полимерного сырья и улучшает конкурентоспособность изделия.

Литература

1. Ревяко, М. М. Некоторые особенности технологии ротационного формования / М. М. Ревяко, Е. З. Хрол // Труды БГТУ. Сер. IV, Химия и технология орган. в-в. – 2007. – № 15. – С. 114–116.
2. Ревяко, М. М. Характеристика этапов цикла ротационного формования / М. М. Ревяко, Е. З. Хрол // Труды БГТУ. Сер. IV, Химия и технология орган. в-в. – 2008. – № 16. – С. 113–115.
3. Ревяко, М. М. Теплопередача в процессе ротационного формования / М. М. Ревяко, С. К. Протасов, Е. З. Хрол // Известия Акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2009. – № 4. – С. 79–82.
4. Shutov, F. A. Integral/Structural Polymer Foams: Technology, Properties and Applications / F. A. Shutov. – Berlin: Springer-Verlag, 1986. – P. 126.
5. Хрол, Е. З. Разработка и изготовление модифицированных изделий из полимерных материалов методом ротационного формования / Е. З. Хрол, М. М. Ревяко // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2009. – Т. 14, № 3. – С. 85–89.

Поступила 26.03.2010