

Исследование теплофизических особенностей установок с жидким теплоносителем для производства газифицируемых моделей

Одной из наиболее перспективных технологий производства сложных отливок ответственного назначения является литье по газифицируемым моделям (ЛГМ). Интенсивное освоение разновидностей ЛГМ-процесса в нашей стране и за рубежом обусловлено возможностью получения точных отливок по качеству сравнимых с литьем по выплавляемым моделям при низких материальных и энергетических затратах. Главным звеном технологической цепи получения отливок по газифицируемым моделям (ГМ), от которого, в значительной степени, зависит качество получаемой детали, является процесс изготовления полимерной модели. В настоящее время в рамках мелкого и массового производства широкое распространение получили ванный и автоклавный способы спекания. Несмотря на многочисленные публикации [1-10], посвященные технологическим особенностям ванного и автоклавного способов спекания, в литературе наблюдается недостаточность информации по вопросу, касающемуся аппаратурного аспекта технологии и рассмотрению этапа передачи тепловой энергии от электрического нагревателя к жидкому теплоносителю. Как в одном, так и в другом способах производства моделей теплопередающей средой является вода, при этом в условиях ванного способа ее температура находится в диапазоне 98-100 °С, в автоклавном – температура воды и ее паров может достигать значения 130-135 °С при давлении 0,2 МПа. Нагрев воды производится трубчатыми электронагревателями (ТЭНами), установленными в донной части ванны (при ванном методе спекания) или же в парогенераторе автоклава (автоклавное спекание).

Данные исследования представляют не только сугубо научный интерес, но и имеют практическое значение. ТЭНы в рамках

Проанализированы теплофизические особенности специализированного оборудования по производству газифицируемых моделей. Экспериментально показано изменение условий теплопередачи в зависимости от температуры жидкого теплоносителя. Обращено внимание на предпочтительность применения плавного повышения напряжения на нагревателе на начальном этапе работы

указанной технологической схемы изготовления ГМ относятся к расходным материалам, которые довольно часто приходится заменять ввиду выхода их из строя. Уяснение создающейся в процессе работы установки теплофизической ситуации позволит предпринять меры и увеличить продолжительность функционирования ТЭНов, а, следовательно, снизить ассигнования на эту статью расходов.

Изучение теплофизических особенностей процесса нагрева теплопередающей среды при изготовлении моделей формованием из подвспененных гранул в условиях автоклавного и ванного спекания проводили на моделирующей установке (рис. 1), представляющей собой прозрачную емкость с водой, нагрев которой осуществляли ТЭНом, установленным в донной части емкости. Хотя на практике в емкостях различных типов автоклавов и ванн обычно устанавливается три, шесть

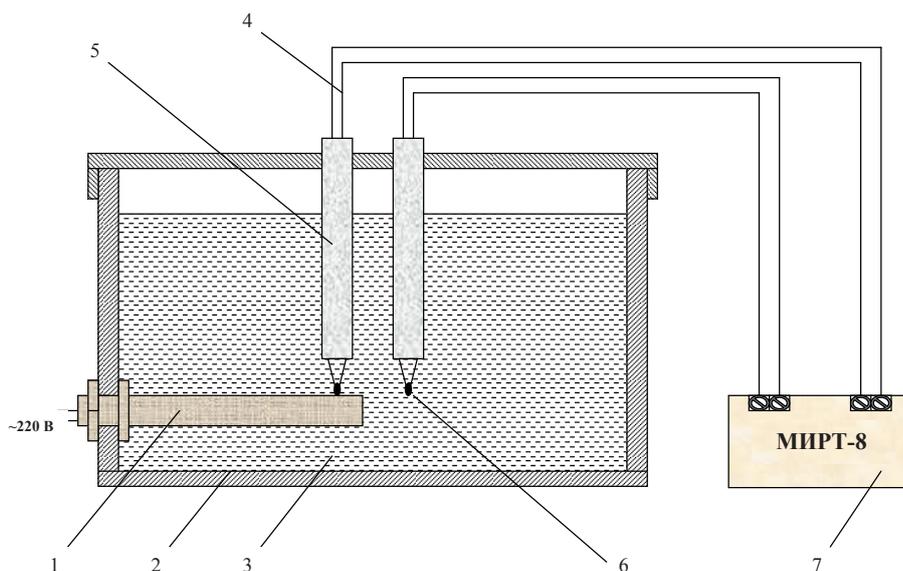


Рис. 1. Схема моделирующей установки для исследования особенностей нагрева ТЭНа и жидкого теплоносителя: 1 – ТЭН; 2 – емкость; 3 – жидкий теплоноситель (вода); 4 – холодные концы термопар; 5 – алундовые соломки; 6 – горячие спаи термопар; 7 – прибор для регистрации и записи значений температуры

или более ТЭНов, исследования были проведены на установке с одним ТЭНом с целью нивелирования влияния теплового воздействия соседних нагревателей. На рабочей поверхности ТЭНа закрепляли горячий спай ХА-термопары. Горячий спай второй ХА-термопары размещали на расстоянии 25 мм от горячего спая первой термопары на том же уровне. Холодные концы термопар подключали с помощью компенсационных проводов к прибору для измерения термо-эдс МИРТ-8 (разработка отдела автоматизации ФТИМС НАНУ). При этом алгоритм проведения опыта заключался в следующем: подача напряжения на ТЭН осуществлялась через 20 с после включения МИРТ-8, нагрев воды в емкости до кипения, охлаждение в течение 15 мин, опять нагрев воды до кипения, охлаждение 10 мин, снова нагрев воды до кипения, охлаждение 5 мин, еще раз нагрев воды до кипения и охлаждение до окончания опыта. Таким образом, моделировали ситуацию, которая происходит в парогенераторе автоклава или в ванне в моменты включения/отключения нагрева воды.

Графический материал, полученный в результате обработки табличных данных на компьютере, представлен на рис. 2. Обращает на себя внимание факт, что в начальный момент подачи напряжения на ТЭН температура его поверхности скачкообразно достигает значения 90 °С (при том, что температура воды, находящейся в непосредственной близости от поверхности ТЭНа, равна 15 °С). Благодаря визуальному наблюдению за процессом нагрева, было отмечено появление на нагревателе паровых пузырьков, время от времени отрывающихся от его поверхности и, под действием архимедовой силы, устремляющихся к свободной поверхности жидкости. Далее на графике отчетливо виден переходный процесс нагрева поверхности ТЭНа,

где вначале заметно постепенное снижение температуры до 85 °С, обусловленное образованием значительного количества паровых пузырьков, способствующих отводу тепла, и затем – медленный подъем температуры до 100 °С. Что касается воды, то ее температура на данном временном отрезке линейно повышается. За этапом нагрева следует этап охлаждения, в течение которого температуры поверхности ТЭНа и воды равны и экспоненциально уменьшаются. Из графика видно, что чем меньше продолжительность охлаждения до момента очередного этапа нагрева, тем менее заметна разница между температурами поверхности ТЭНа и воды. Длительность нагрева, в основном, определяется мощностью установленных нагревателей, а величина временного промежутка между подачей на них напряжения – технологическими особенностями изготовления модели, а именно – необходимостью точного поддержания требуемой величины давления или температуры. Чем шире диапазон уставки управляемой величины (давление, температура), тем продолжительнее будет пауза между включениями.

Анализ полученных данных, оформленных в виде таблицы, позволил установить, что на всех четырех этапах нагрева скорость возрастания температуры на поверхности ТЭНа в момент подачи напряжения одинакова и равна 5 °С/с, в то же время скорость реагирования воды на момент увеличения теплового потока на каждом из четырех этапов различна. Так, на начальном этапе на момент включения нагревателя вода реагирует повышением температуры на 1 °С со скоростью 0,0210 °С/с, на втором – 0,0625, на третьем – 0,1110 и на заключительном этапе – 0,1430 °С/с. Следовательно, с повышением температуры воды интенсифицируется отвод тепла от поверхности ТЭНа. Об этом свидетельствуют и справочные данные из [11] (табл. 1). То же можно

предположить и относительно паров воды, исходя из табл. 2.

Нельзя не обратить внимание на еще один важный вопрос. В процессе работы автоклава необходимо осуществлять пополнение парогенератора водой с периодичностью, отвечающей производительности оборудования. При использовании для этих целей воды с карбонатной жесткостью более 0,7 мг-экв/л происходит отложение известковой накипи на поверхностях ТЭНов и стенках парогенератора. При значительной толщине накипи и налетов (при отсутствии должной фильтрации) это приводит к снижению теплопередачи

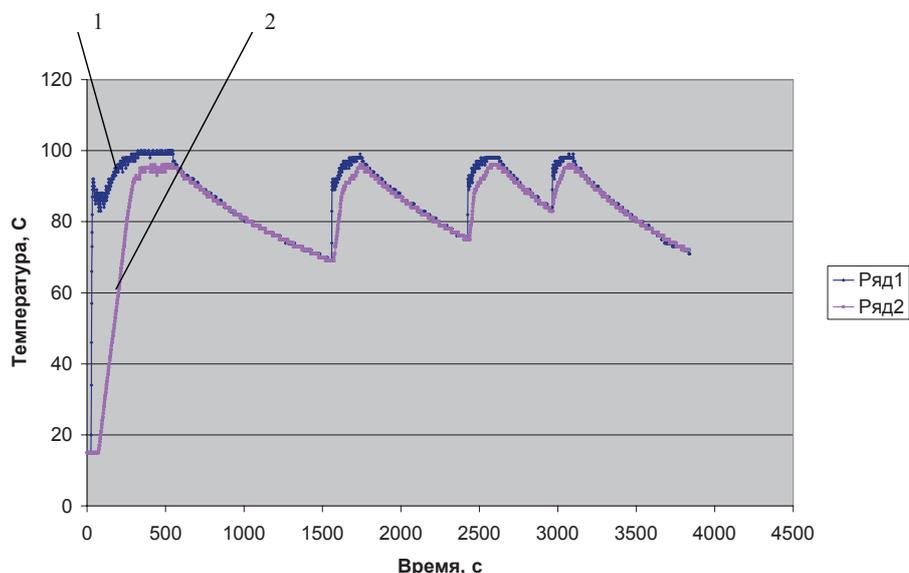


Рис. 2. Кривые нагрева поверхности ТЭНа и жидкого теплоносителя (воды): 1 – температура поверхности ТЭНа; 2 – температура воды

Таблица 1
Коэффициент теплопроводности воды [11]

Температура t , °С	λ , $10^{-6} \frac{\text{ккал}}{\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{град}}$
0	1350
100	1631
200	1569
300	978

Таблица 2
Коэффициент теплопроводности водных паров [11]

Температура t , °С	λ , $10^{-4} \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}}$
0	212
110	217
120	224
130	231
140	238
150	246

от ТЭНа вследствие появления дополнительного термического сопротивления. В местах интенсивного образования накипи нагреватель перегревается и выходит из строя. Таким образом, вопросу обеспечения установки водой, удовлетворяющей необходимым требованиям, нужно уделять пристальное внимание. Для этого на некоторых предприятиях заправку автоклавов осуществляют дистиллированной водой. Кроме того, специалисты рекомендуют не реже, чем через 8 ч работы, сразу же после сброса давления пара, не допуская охлаждения воды ниже 95 °С, производить ее слив из парогенератора с целью снижения количества оседающих отложений.

Полученными данными можно, в некоторой степени, объяснить тот факт, что именно в момент включения установки, преимущественно на начальном этапе нагрева воды, нагреватели выходят из строя. В этом случае в нихромовой спирали ТЭНа в результате броска тока создаются условия образования местного перегрева, вследствие чего сформировавшийся тепловой поток не успевает передаться от спирали и она перегорает в наиболее слабом месте. Поэтому, с целью продления срока службы нагревателей можно рекомендовать, хотя бы на начальном этапе работы, осуществлять плавное повышение величины рабочего напряжения ТЭНа и тщательно следить за качеством используемой воды.

При повышении мощности ТЭНов, а следовательно, и температурного напора (разность температур рабочей поверхности ТЭНа и температуры насыщения воды при заданном давлении), возрастает и поток тепла, который отводится от поверхности ТЭНа к воде, что влечет за собой повышение скорости нагрева воды в парогенераторе автоклава, а отсюда – к интенсификации производительности

оборудования. Известно также [12], что при увеличении температурного напора тепловой поток растет не беспредельно. При определенном значении температурного напора тепловой поток достигает первого критического значения $q_{кр1}$, за которым при увеличении температурного напора следует уменьшение отводимого от поверхности ТЭНа тепла. То есть за пузырьковым режимом кипения следует переходный режим, характеризующийся интенсивным образованием и слиянием крупных пузырей, ухудшающих отвод тепла водой от поверхности нагревателя. Формируются отдельные участки «сухих» пятен, исключенных из теплообмена. Дальнейшее повышение температурного напора способствует наступлению пленочного режима кипения, когда рабочая поверхность нагрева отделена от воды сплошной пленкой пара, в результате чего отводимый от поверхности тепловой поток имеет минимальное значение, называемое вторым критическим $q_{кр2}$. Поэтому высказываются предположения о том, что в некоторых случаях в процессе работы автоклава могут создаться условия, при которых может быть нарушен температурный баланс между количеством подводимого к наружной поверхности ТЭНа тепла и максимальным тепловым потоком, который может быть отведен в кипящую воду. Для анализа данного положения можно воспользоваться зависимостью из работы [13]

$$q_{кр1} = 0,14r \sqrt{\rho'' \sqrt{\sigma g (\rho' - \rho'')}} \quad (1)$$

где r – теплота парообразования, Дж/кг; ρ'' – плотность пара, кг/м³; σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ' – плотность жидкости, кг/м³.

Приведенная формула используется для расчета значения $q_{кр1}$ при кипении жидкости на горизонтальных трубах и плитах в условиях свободного движения (большого объема). Исходя из того, что в процессе работы происходит изменение величины давления пара в автоклаве, произведем расчет $q_{кр1}$ для минимального и максимального значений диапазона:

1) При давлении $P = 1,013$ бар, температуре $t = 100$ °С согласно [12] значения вышеприведенных переменных следующие: $r = 2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг; $\rho'' = 0,598$ кг/м³; $\sigma = 5,89 \cdot 10^{-2}$ Н/м; $g = 9,81$ м/с²; $\rho' = 958,4$ кг/м³. Из (1) значение $q_{кр1} = 1,19 \cdot 10^6$ Вт/м²;

2) При давлении $P = 3,61$ бар, температуре $t = 140$ °С согласно [12] значения указанных переменных: $r = 2,15 \cdot 10^6$ Дж/кг; $\rho'' = 1,97$ кг/м³; $\sigma = 5,07 \cdot 10^{-2}$ Н/м; $g = 9,81$ м/с²; $\rho' = 926,1$ кг/м³. Из (1) значение $q_{кр1} = 1,96 \cdot 10^6$ Вт/м².

На следующем этапе решения поставленной задачи необходимо определить значение рассеиваемой тепловой энергии q с единицы поверхности нагревательного элемента. Для этого необходимо

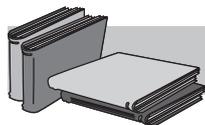
знать геометрические и электрические параметры ТЭНа. К примеру, для ТЭНа автоклава ГК-100 с напряжением питания ~ 220 В, мощностью $P = 2$ кВт наружный диаметр рабочей поверхности равен 12,5 мм при ее длине 720 мм. В этих условиях площадь S рабочей поверхности ТЭНа составляет 0,03 м². Отсюда, учитывая, что $q = P/S$, $q = 0,07 \cdot 10^6$ Вт/м². Соотношение $q_{кр1}/q$ покажет степень отличия рассчитанных значений тепловых потоков для минимального и максимального значений давления пара: 1) $q_{кр1}/q \approx 17$; 2) $q_{кр1}/q \approx 28$.

Таким образом, для того чтобы в ванне спекания или парогенерирующей емкости автоклава создались условия для перехода режима кипения из пузырькового в пленочный необходимо при одних и тех же геометрических размерах ТЭНа увеличить его мощность более чем на порядок. При этом следует подчеркнуть, что формула (1) позволяет определять некоторое среднее значение $q_{кр1}$. На практике величины критических тепловых потоков могут отличаться от рассчитанных до $\pm 35\%$ [12]. Повышение шероховатости поверхности нагревателя в результате отложения незначительного слоя налетов повышает значение

критической плотности теплового потока. В то же время кипение жидкости, которая не смачивает поверхность нагревателя, значительно уменьшает величину $q_{кр1}$. К примеру, данная ситуация может возникнуть, если на поверхности ТЭНа будут иметь место следы смазочного материала. Кроме того, на $q_{кр1}$ имеют влияние также и другие факторы [12], в результате чего определение точного значения критического теплового потока представляет собой довольно сложную задачу. Однако даже при таком значительном разбросе рассчитанных значений и возможных предполагаемых величин тепловых потоков, полученных на практике, можно сделать вывод о невозможности существования при данных исходных параметрах пленочного режима кипения жидкости на поверхности ТЭНа.

Выводы

В результате проведенных исследований установлены изменения условий теплопередачи в зависимости от температуры жидкого теплоносителя (воды). Проанализированы значения формирующегося теплового потока в результате нагрева ТЭНа. Показана предпочтительность применения плавного повышения напряжения на нагревателе на начальном этапе работы.



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. Кирпиченков В. П. Технологический процесс литья по газифицируемым моделям. – М.: НИИМАШ, 1971. – 100 с.
4. Чудновский А. Р. Литье по моделям из пенопласта. – М.: Химия, 1970. – 160 с.
5. Шуляк В. С., Рыбаков С. А., Григорян К. А. Производство отливок по газифицируемым моделям. – М.: МГИУ, 2001. – 330 с.
6. Шуляк В. С. Литье по газифицируемым моделям. – СПб: НПО «Профессионал», 2007. – 408 с.
7. Шинский О. И. Газогидродинамика и технологии литья железоуглеродистых и цветных сплавов по газифицируемым моделям: Дис. ... докт. техн. наук. – Киев, 1997. – 481 с.
8. Козоброд Д. Б., Фесенко А. Н. Перспективный способ изготовления пенополистироловых моделей // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2009. – № 1 (15). – С. 170-174.
9. Мандрик Е. А. Новые направления в технологии точного литья с применением пенополимеров: Дис. ... докт. техн. наук. – Краматорск, 1996. – 254 с.
10. Киореан С. Хорацю Раду (Румыния). Оптимизация технологических параметров получения газифицируемой модели из пенополистирола: Дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1996. – 162 с.
11. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
12. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.
13. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.

Summary

O. Iakovyshyn

Research of thermophysical features of plant with liquid heat carrier for production of polymeric models

The thermophysical features of the specialized equipment on production of polymeric models are analysed. The change of terms of heat transfer depending on the temperature of liquid heat carrier is experimentally shown. The preference of application of smooth rise of tension on a heater on the initial stage of work is shown.

Проаналізовано теплофізичні особливості спеціалізованого обладнання для виробництва моделей, що газифікуються. Експериментально показано зміну умов теплопередачі в залежності від температури рідкого теплоносія. Звернено увагу на доцільності застосування плавного підвищення напруги на нагрівачі на початковому етапі роботи.

УДК 621.744.072.2

К. Х. Бердыев, В. С. Дорошенко (ФТИМС НАНУ*)

Проходной туннельный автоклав для получения пенопластовых литейных моделей

Структурно-инновационное совершенствование отечественного производства связано с использованием научно-технологического потенциала, внедрением ресурс- и природосберегающих технологий. В выпуске отечественной промышленной продукции долю машиностроения планируется довести почти до 1/5 при сокращении доли металлургии [1]. Это вызывает потребность ориентации на наукоемкие технологии, снижающие металло- и энергоемкость продукции машиностроения, при развитии его собственной заготовительной базы, к которой относится литейное производство.

Обладая солидным научно-техническим заделом и патентами десятков изобретений в области литья по газифицируемым моделям (ЛГМ), ФТИМС НАНУ постоянно совершенствует эту технологию как одну из наиболее перспективных для получения точных отливок. Цикл научно-технических работ, проводимых сегодня институтом, включает перевод ЛГМ на конвейерные и непрерывного действия способы с максимальным энергосбережением. Если ряд образцов нового проходного оборудования непрерывного действия для переработки формовочных сыпучих материалов при ЛГМ описан в недавно опубликованной статье [2], то для синхронизации потоков модельного и формовочного производств необходимы такие же конструкции модельных установок.

Выполнен анализ основных современных методов производства моделей для литья по газифицируемым моделям. Выбор их зависит от серийности и размеров получаемых отливок. Разработана конструкция автоклава проходного типа с тремя камерами. Она легко встраивается в конвейерные линии изготовления моделей, экономит энергию путем уменьшения выбросов пара в атмосферу цеха, а также снижает затраты ручного труда автоматизацией процесса охлаждения пресс-форм и их перемещения

Литейщики на сегодняшний день применяют при ЛГМ четыре основных способа модельного производства (перечислены в порядке возникновения и усложнения конструкций оборудования): вырезание из блочного пенополистирола (ППС) нагретой проволокой; спекание в пресс-формах в камерах автоклавов; спекание в пресс-формах на модельных полуавтоматах; вырезание на фрезеровально-гравировальных станках с ЧПУ. Кратко рассмотрим состояние этих способов в современных условиях, основными критериями выбора которых при проектировании производственного процесса являются количество и размеры получаемых отливок.

Использование сравнительно простого оборудования для вырезания нагретой проволокой единичных моделей и элементов литниково-питающей системы из блочного ППС (в частности, стола для термопорезки ППС по шаблонам) может быть выгоднее других способов, хотя более трудоемко. При этом изготовление моделей сложной кон-

* Работа выполнена под руководством проф. О. И. Шинского