

УДК 621.74.045

О. А. Яковышин

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫЙ СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГАЗИФИЦИРУЕМЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Разработан и исследован процесс теплового воздействия на гранулы подвспененного полимера в условиях новой технологической схемы изготовления газифицируемых моделей. Рассмотрены особенности прогрева углеродного сыпучего наполнителя проходящим электрическим током. Представлен теоретический анализ электрических процессов, проходящих в исследуемой системе.

Ключевые слова: газифицируемые модели, подвспененный полимер, углеродный сыпучий наполнитель, электрический ток.

Розроблено та досліджено процеси теплового впливу на гранули спіненого полімеру в умовах нової технологічної схеми виготовлення моделей, що газифікуються. Розглянуто особливості прогріву вуглецевого сипучого наповнювача електричним струмом. Представлено теоретичний аналіз електричних процесів, які проходять в досліджуваній системі.

Ключові слова: моделі, що газифікуються, спінений полімер, вуглецевий сипучий наповнювач, електричний струм.

Developed and investigational process of the thermal affecting to granules of polymer submade to foam in the conditions of new technology of making of polystyrene models. The features of warming up of carbon friable filler a electric current are considered. The theoretical analysis of electric processes, reeving in the investigated system is presented.

Keywords: polystyrene models, polymer submade, carbon friable filler, electric current.

Качество отливок, производимых по технологической схеме литья по газифицируемым моделям (ЛГМ), во многом зависит от точности размеров, чистоты поверхности и прочностных характеристик газифицируемой модели (ГМ). В зависимости от серийности производства и предъявляемых требований к отливке модель может быть изготовлена из блочного пенополистирола (механическая обработка фрезой, резка пенополистирола нагретой нихромовой проволокой) либо спеканием подвспененных гранул в пресс-форме (горячий воздух, автоклавное спекание, метод теплового удара, ванное спекание, спекание в динамическом потоке пара, спекание в поле высокой частоты) [1-6]. Анализ современного состояния производства отливок ЛГМ-способом показывает, что преимущественно используют обработку пенополистироловых блоков нагретой проволокой, автоклавное спекание, метод теплового удара. Это, в первую очередь, обусловлено простотой и практичностью

применяемого для изготовления моделей оборудования. К тому же, означенные способы позволяют достигать хорошего качества моделей сложной конфигурации. В рамках серийного производства ГМ изготавливаются путем нагрева подвспененных гранул в замкнутом объеме пресс-формы, в результате происходит формообразование модели с требуемыми механическими и технологическими свойствами. При этом, к примеру, рассматривая такой широко распространенный автоклавный способ производства моделей, можно убедиться, что процесс переноса тепла к гранулам, находящимся в полости пресс-формы, характеризуется значительной сложностью. Так, на начальном этапе процесса происходит нагрев расположенных в донной части парогенератора трубчатых электронагревателей (ТЭН) током, проходящим по их нихромовым спиральям, и преобразование электрической энергии в тепловую. От внешней поверхности ТЭНов к воде тепло переносится путем теплопроводности и конвекции. Механизм распространения тепла в воде, которая является капельной жидкостью, представляется как перенос энергии путем нестройных упругих колебаний. По мере увеличения температуры воды и начала ее кипения образуется пар, который по команде оператора подается в рабочую камеру автоклава, где находится заполненная гранулами пресс-форма. Согласно кинетической теории вещества, перенос тепла теплопроводностью в газах при обычных давлениях и температурах определяется переносом кинетической энергии молекулярного движения в результате хаотического движения и столкновения отдельных молекул газа. С течением времени давление пара повышается до необходимого уровня (обычно 0,18-0,22 МПа), что позволяет увеличить его температуру при указанных значениях давления до 130,5-135,1 °С. Далее теплопередача от пара к наружной поверхности пресс-формы совершается путем теплопроводности и конвекции. При этом следует учесть, что если формообразование происходит в режиме стационарного спекания, мы имеем дело с естественной конвекцией теплоносителя в рабочем объеме камеры. В случае применения динамического способа спекания (в направленном потоке пара) конвекция носит искусственный характер. В стенке пресс-формы в направлении градиента температур тепло распространяется путем теплопроводности. Наконец, тепло от внутренней поверхности пресс-формы переносится к навеске гранул пенополистирола, преимущественно, за счет теплопроводности и в результате проникновения пара внутрь пресс-формы в случае, если ее конструкция предусматривает наличие вент в ее стенках.

Таким образом, при автоклавном спекании сталкиваются с довольно продолжительной цепочкой преобразования и передачи энергии, что, несомненно, снижает коэффициент полезного действия установки данного типа. Идеальным способом формообразования полимерной модели можно считать такой способ, в условиях которого тепловое воздействие осуществляется непосредственно на подвспененные гранулы, минуя все возможные промежуточные этапы теплопередачи. В некоторой степени приведенному требованию удовлетворяет давно известная технология, заключающаяся в преобразовании энергии электрического поля высокой частоты в тепловую энергию, выделяющуюся вследствие диэлектрических потерь на поверхности гранул, предварительно обработанных водой либо электролитом. Длительность процесса формирования модели в поле высокой частоты значительно ниже по сравнению с остальными известными способами, поскольку прогрев и спекание гранул происходят по всему объему навески. В то же время следует признать, что указанный способ до настоящего времени не нашел должного применения ввиду значительной энергоемкости и возникающих технологических трудностей при получении моделей сложной конфигурации. Поиск путей решения задачи сокращения технологических этапов преобразования энергии при производстве пенополимерных моделей привел к разработке способа спекания в сыпучем электропроводном материале [7, 8]. При пропускании электрического тока через конгломерат углеродных частиц, в котором находится пресс-форма с гранулами пенополистирола, благодаря контактному сопротивлению создается тепловой

поток в дисперсной системе, направленный к стенкам пресс-формы. Известно, что деформация пенополистирола достигает своего максимального значения при спекании в пресс-форме в интервале температур 120-130 °С. Достижение указанных значений температур происходит за существенно меньший промежуток времени, чем это наблюдается в широко распространенном в производстве автоклавном способе получения моделей. В условиях же ванного способа спекания такие температуры вообще недостижимы (за исключением того случая, когда в воду специально вводятся водорастворимые соли, либо вообще заменяют воду другим жидким теплоносителем). Сокращение времени выхода на требуемую рабочую температуру теплопередающей углеродной сыпучей среды объясняется более низкой удельной

теплоемкостью графита. Суть способа показана на рис. 1, на котором схематически изображена его упрощенная реализация с помощью устройства, представляющего собой изготовленный из диэлектрического материала контейнер, состоящий из опоки 1 и крышки 2. В опоке смонтированы специальные основания 3, на которые устанавливается пресс-форма 4, заполненная вспененными гранулами материала 5. Электропроводный сыпучий наполнитель 6 заполняет весь свободный внутренний объем контейнера. Электрический ток подводится к сыпучему наполнителю с помощью контактов 7. Система управления 8 обеспечивает подачу напряжения на контакты и точную регулировку нагрева при помощи термопары 9. При подаче напряжения, которое в данном случае может быть переменным либо постоянным, по сыпучему наполнителю проходит электрический ток, начинающий нагревать частицы наполнителя, которые, в свою очередь, отдают тепло через

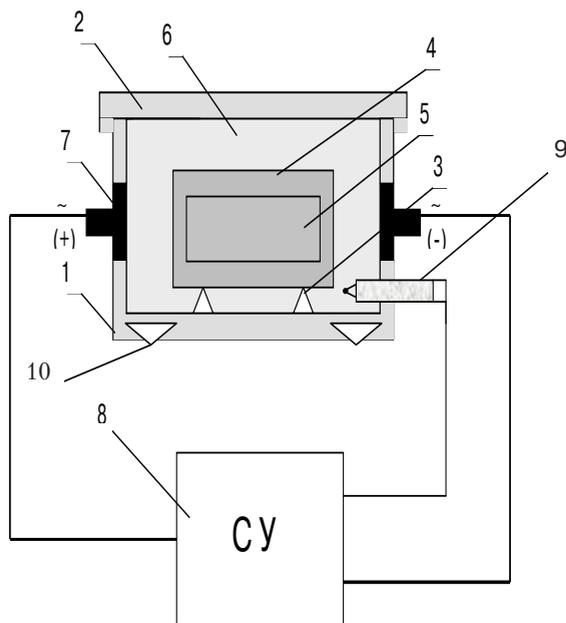


Рис. 1. Схема устройства для получения моделей новым способом: 1 – опока; 2 – крышка; 3 – основания; 4 – пресс-форма; 5 – вспененные гранулы полимера; 6 – электропроводный сыпучий наполнитель; 7 – электродоконттакт; 8 – система управления; 9 – термопара; 10 – шибер

стенки пресс-формы гранулам материала. После технологической операции формообразования модели с контактов 7 снимают напряжение, открывают шибер 10 и горячий сыпучий наполнитель попадает в полость герметичной технологической камеры, из которой затем опять засыпается в подготовленный к спеканию модели контейнер.

Исходя из того, что в предложенной технологической схеме изготовления ГМ используется иной вид теплоносителя, возникает необходимость в анализе процессов электрического нагрева углеродного материала, в качестве которого был использован графит марки ЭГО. Литературные источники [9] показывают, что ошибочно опираться на данные электрических и тепловых свойств монолитного углеродного материала, в котором частицы связаны прочными химическими связями, и проводить аналогии с конгломератом сыпучего материала. В этом случае перенос как электрической, так и тепловой энергии принципиально отличается. К тому же следует отметить, что влияние свойств самого материала на протекание указанных процессов не является столь определяющим по сравнению со свойствами

контактов между взаимодействующими частицами. Иными словами, электрический ток при протекании по сыпучему наполнителю встречается на своем пути не только внутреннее сопротивление материала засыпки, но и контактное, величина которого может существенно превосходить сопротивление монолита. Следовательно, электрические свойства дисперсной системы необходимо рассматривать с точки зрения имеющихся моделей электрического сопротивления контактирующих поверхностей [9]. В исследованиях электрических контактов электрофизики могут опираться на разработанные до настоящего времени две теории – Чельхина и Хольма [9, 10]. Авторы обеих концепций, несмотря на некоторые различия в представлениях о механизме взаимодействия контактирующих поверхностей, в конечном итоге приходят к одинаковому аналитическим зависимостям, описывающим сопротивление контакта. Так, в теории Чельхина контакт представляется первоначально в виде односточечного соприкосновения вершин двух пирамид, которые с увеличением прилегаемой к ним нагрузки деформируются, в результате чего число и площадь контактных поверхностей возрастает, а сопротивление контакта соответственно уменьшается. Электросопротивление односточечного контакта в теории Чельхина рассчитывается следующим образом:

$$R = kP^{-1/2}, \quad (1)$$

где P – давление на контакт, кПа; k – коэффициент, зависящий от свойств материала контактирующих тел и степени механической обработки их поверхностей.

Согласно теории Хольма, контакт рассматривается с несколько иных позиций: он имеет кажущуюся и истинную поверхность. Причем, под кажущейся поверхностью подразумевается площадь всего контакта, в то время как истинная является поверхностью действительного соприкосновения контактов. К тому же следует добавить, что Хольм контактное сопротивление представляет в виде суммы поверхностного сопротивления и сопротивления стягивания. Поверхностное сопротивление обусловлено наличием на контактной поверхности абсорбционных пленок. В условиях идеально чистой поверхности величиной указанного сопротивления можно пренебречь [10]. В то же время сопротивление стягивания при прохождении тока присутствует в любом случае и может быть определено

$$R_c = \frac{\rho_0}{2a}, \quad (2)$$

где ρ_0 – удельное электрическое сопротивление материала; a – радиус a -пятна (общее количество реальных мест перехода электрического тока).

Анализ зависимостей (1) и (2) показывает, что они, в принципе, являются взаимозаменяемыми и дополняющими друг друга. В самом деле, сопротивление контакта будет понижаться благодаря уменьшению удельного электрического сопротивления материала, а также с увеличением давления на контактирующие поверхности, что одновременно сопряжено с возрастанием количества мест перехода тока a , следовательно, и радиуса a -пятна.

Необходимо также отметить, что в последнее время наблюдается повышенный интерес исследователей (в том числе и отечественных) к проблеме изучения вопросов, лежащих в основе механизма нагрева сыпучих углеродных материалов, через который проходит электрический ток, что связано со значительной практической ценностью получаемых знаний [11-24].

С целью установления различия степени нагрева теплопередающей углеродной среды в лабораторных условиях были проведены две серии экспериментальных исследований, в одной из которых изучали нагрев электрическим током монолитного образца (керны), во второй – сыпучего углеродного материала той же марки.

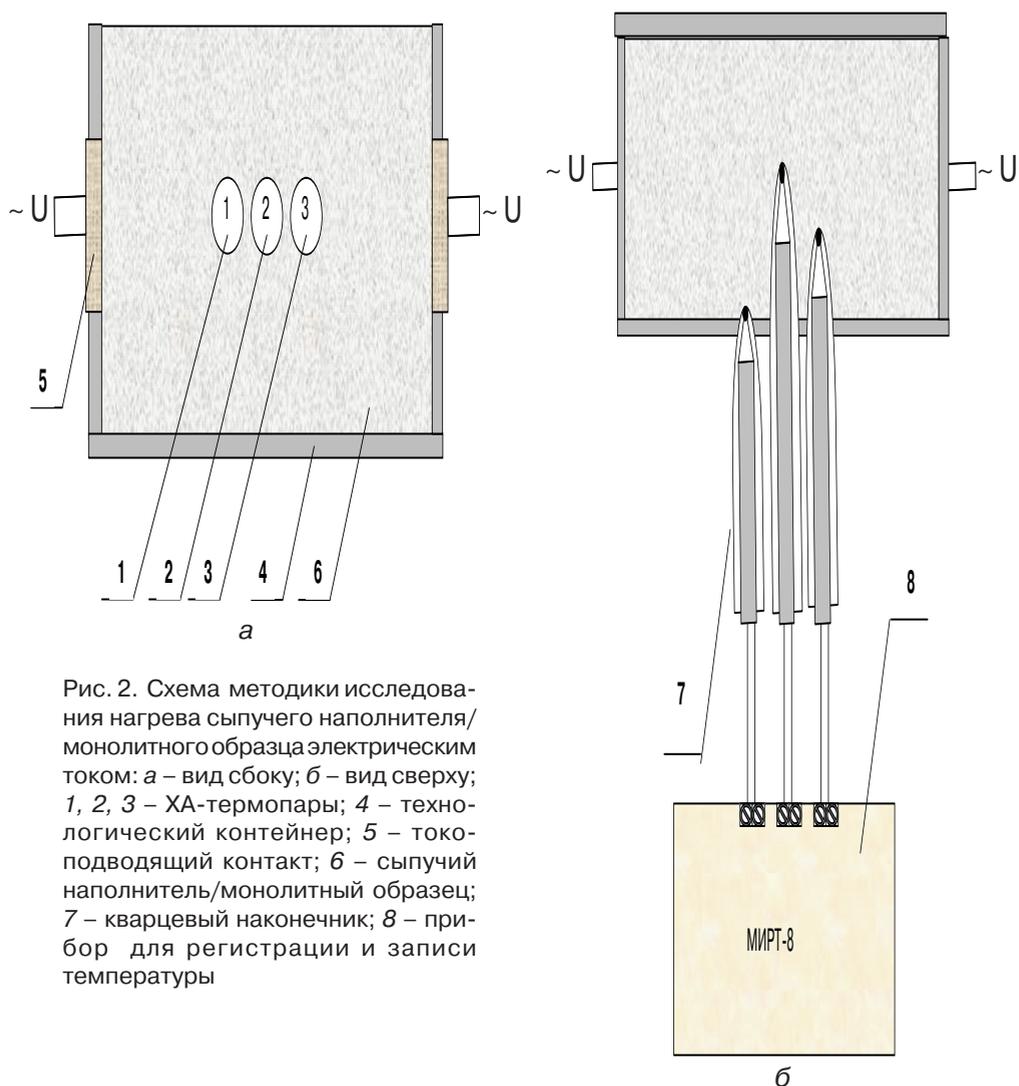


Рис. 2. Схема методики исследования нагрева сыпучего наполнителя/монокристаллического образца электрическим током: а – вид сбоку; б – вид сверху; 1, 2, 3 – ХА-термопары; 4 – технологический контейнер; 5 – токоподводящий контакт; 6 – сыпучий наполнитель/монокристаллический образец; 7 – кварцевый наконечник; 8 – прибор для регистрации и записи температуры

Для этого был изготовлен технологический контейнер из изоляционного материала (рис. 2). В обоих торцах с помощью резьбового соединения устанавливались медные токоподводящие контакты. В центральной области одной из боковых стенок контейнера просверливали три отверстия на одном уровне, в которые вводили горячие спаи ХА-термопар в кварцевых наконечниках с таким расчетом, чтобы первая термопара регистрировала температуру на поверхности монокристаллического образца (либо сыпучего наполнителя), вторая – на его оси, а третья – на половине расстояния от оси до поверхности. Холодные концы термопар посредством компенсационных проводов подключали к прибору для регистрации и записи температур МИПТ-8 (разработка отдела автоматизации ФТИМС НАН Украины). Подачу переменного напряжения на образец и фиксацию термовременных зависимостей осуществляли одновременно. Время, в течение которого по образцу пропускали электрический ток, равнялось 20 с. Напряжение холостого хода источника ТДМ-401 составляло 51,2 В. Поскольку величины токов в эксперименте достигали нескольких сотен ампер, для их измерения применяли амперметр переменного тока со шкалой на 600 А и трансформатор тока ТК-40 (0,66 кВ, 600/5, 10 ВА). На рис. 3 представлены графические результаты экспериментов. При сравнении графиков а, б, в обращает на себя существенное внимание отличие температур во всех трех точках. Так, в опыте а, несмотря на то, что по монокристаллическому образцу графита протекал ток около 280 А, значение темпера-

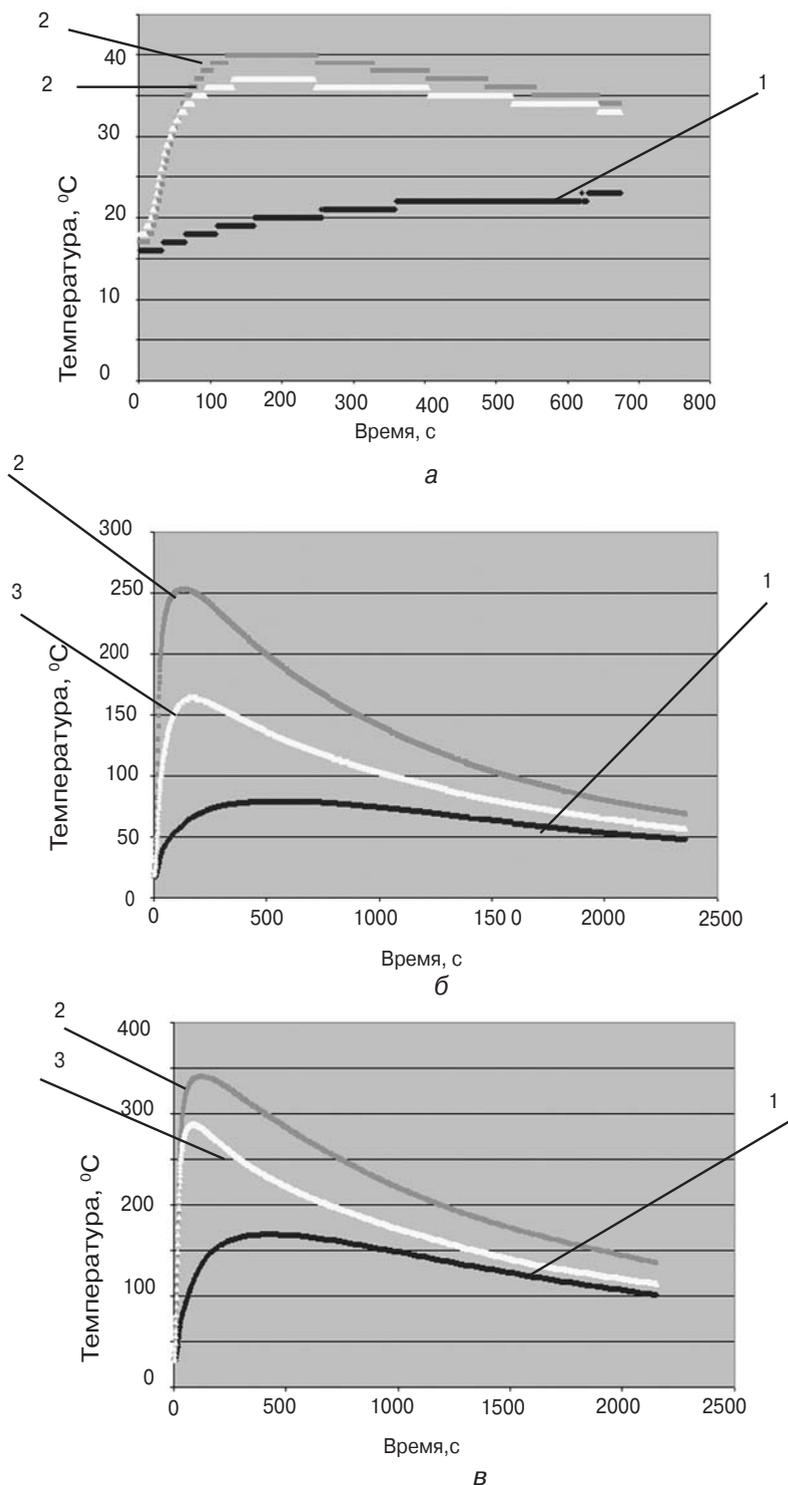


Рис. 3. Нагрев графитного образца пропускаемым электрическим током: а – монолитный образец; б – порошок графита; в – порошок графита под давлением груза; 1 – термопара, регистрирующая температуру образца на его поверхности; 2 – термопара, регистрирующая температуру в центре образца; 3 – термопара, регистрирующая температуру в точке, расположенной на половине расстояния от центра к поверхности

туры в центре образца на 125-й секунде опыта равнялось всего 40 °С, в то время как в опыте б, где исследовался сыпучий графит, к этому времени температура была 253 °С, а в опыте в – 341 °С. Этот факт объясняется ранее упомянутым свойством сыпучего электропроводного материала, а именно, контактным сопротивлением. Обратим внимание, что падение напряжения на монолитном образце составляло 2 В, на неуплотненном сыпучем – 47,8 В, а на сыпучем графите, находящемся под давлением груза, – 26 В. Из литературных источников [15, 16] известно, что степень перегрева контакта сильно зависит от контактного напряжения. Поскольку величина контактного напряжения неуплотненного графита значительно превосходит значение напряжения на монолитном образце, то даже при существенно меньшем токе (20 А) удастся достичь большей температуры исследуемого материала. Что же касается уплотненного сыпучего графита, в этом случае вследствие падения его электрического сопротивления при подаче напряжения ток самопроизвольно повышается и соответственно растет тепловая мощность исследуемой системы.

В процессе проведения экспериментов по термометрированию столкнулись с интересной особенностью сыпучего углеродного материала, заключающейся в сохранении неизменного значения контактного сопротивления после снятия приложенной к нему механической силы. Иными словами, в опыте в значение контактного сопротивления (проходящий электрический ток) углеродного материала, находящегося под воздействием груза, оказывающего давление 13,8 кПа, не изменялось после снятия механической нагрузки. Это явление, называемое электроконтактной памятью, на примере термоантрацита глубоко изучено и детально освещено в работах отечественных исследователей [18, 22, 24]. Поэтому по аналогии с термоантрацитом можно предположить, что контактное пятно взаимодействующих частиц графита, сформированное под избыточным давлением, остается неизменным при понижении механического усилия на контакт ввиду того, что графит не обладает эластичностью. Следовательно, для уменьшения контактного сопротивления и обеспечения равномерности нагрева эффективно использование кратковременного пригружения навески сыпучего материала.

Далее оказалось необходимым изучить следующее важное обстоятельство. Поскольку технологически для изготовления пенополистироловой модели, согласно электроконтактному способу спекания, по электропроводному наполнителю контейнера необходимо пропустить электрический ток, он, несомненно, будет протекать и через находящуюся в нем пресс-форму. Это обусловлено тем, что пресс-формы преимущественно изготавливают из алюминиевых сплавов, являющихся превосходными проводниками электрического тока. Ввиду вышеизложенного проанализируем электрическую ситуацию в контейнере на предмет возможности шунтирования тока по массе пресс-формы, что, в свою очередь, может повлиять на увеличение проходящего по цепи тока и, как результат, к выходу питающего источника из строя. Кроме того, при прохождении тока преимущественно по массе пресс-формы может образоваться локальная тепловая зона максимального нагрева, что сформирует резкий градиент температур между наружной и внутренней областями формирующейся модели. Для этого технологическую схему электроконтактного спекания представим следующим образом (рис. 4, а). Параллельные ветви заменим эквивалентным сопротивлением. В этом случае электрическая схема преобразится к виду (рис. 4, б) и общее сопротивление цепи будет определяться суммой трех последовательных сопротивлений. Допустим, что сопротивление пресс-формы настолько мало, что

слагаемое $\frac{R_{H2} \cdot R_{П-Ф}}{R_{H2} + R_{П-Ф}} \rightarrow 0$. Сделаем также допущение, что $R_{H1} = R_{H2} = R_{H3} = R_H$ (при

одинаковых геометрических размерах областей, представленных указанными резисторами, это вполне логично). Тогда ток I_1 , протекающий по указанной цепи при приложении напряжения U , находим из следующей зависимости:

$$I_1 = \frac{U}{2R_H}. \quad (3)$$

Для сравнительной оценки проведем подобный анализ схемы, в которой сопротивление пресс-формы заменим сопротивлением $R_{\text{доб}}$ сыпучего углеродного наполнителя (рис. 4, в). При этом $R_{\text{доб}} = R_{\text{Н1}} = R_{\text{Н2}} = R_{\text{Н3}} = R_{\text{Н}}$ и указанную схему можно привести к виду (рис. 4, г). В условиях приложения к полученной схеме напряжения U проходящий по ней ток I_2 определим по формуле

$$I_2 = \frac{U}{2,5R_{\text{Н}}} \quad (4)$$

Анализируя уравнения (1) и (2), приходим к выражению

$$\frac{I_1}{I_2} = 1,25, \quad (5)$$

иными словами, даже при тех максимально “неблагоприятных” допущениях, принятых нами ранее, ток, проходящий в контейнере с расположенной в нем пресс-формой, будет превышать ток в контейнере аналогичных размеров, но заполненного только электропроводным наполнителем, ориентировочно в 1,25 раза. Следовательно, при выборе источника питания по максимально рассчитанному значению тока не должно быть никаких опасений по поводу перегрузок в процессе работы (в случае изменения соотношения размеров контейнера и пресс-формы).

Опираясь на результаты работы [20], касающиеся изучения дросселирования потока угольной шихты в электрокальцинаторе, проведем теоретический анализ процесса электроконтактного нагрева сыпучего углеродного наполнителя и расположенной в нем пресс-формы. Представим электроконтактный способ спекания в виде эквивалентной электрической схемы. Она будет, в принципе, аналогичной ранее рассмотренной схеме (рис. 4), но более детализированной (рис. 5 а, б). В результате проведенных преобразований общее сопротивление цепи определим из выражения

$$R_{\text{Общ}} = \frac{1}{\frac{R_{\text{СК1}} + R_{\text{СК2}}}{R_{\text{СК1}} \cdot R_{\text{СК2}}} + \frac{1}{\frac{R_{\text{СПФ1}} \cdot R_{\text{СПФ2}}}{R_{\text{СПФ1}} + R_{\text{СПФ2}}} + R_{\text{ТПФ1}} + R_{\text{ТПФ2}}}} + R_{\text{ГК1}} + R_{\text{ГК2}} \quad (6)$$

Количество теплоты Q_1 , образованное при прохождении электрического тока I по углеродному наполнителю и пресс-форме в течение времени t , определим из известной зависимости

$$Q_1 = I^2 R_{\text{Общ}} t \quad (7)$$

Количество теплоты Q_2 , полученное системой “углеродный наполнитель-пресс-форма-гранулы пенополистирола” можно представить в следующем виде:

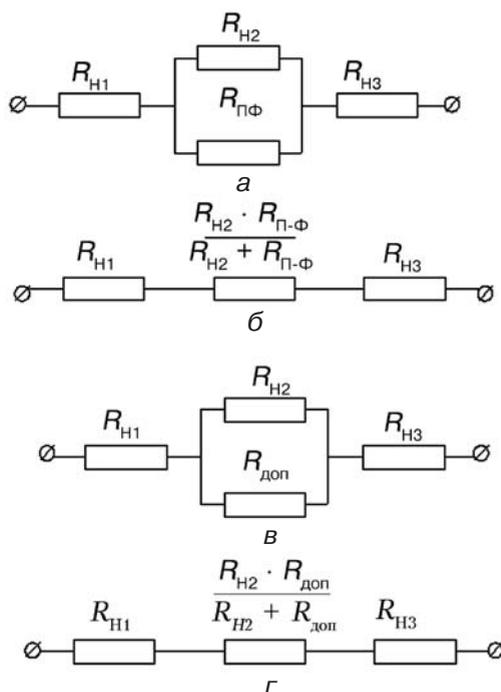


Рис. 4. Электрическая модель электроконтактного способа спекания: а – исходная с сопротивлением пресс-формы; б – преобразованная; в – исходная без сопротивления пресс-формы с дополнительным сопротивлением; г – преобразованная; $R_{\text{Н1}}, R_{\text{Н2}}, R_{\text{Н3}}, R_{\text{доб}}$ – сопротивления углеродного наполнителя; $R_{\text{П-Ф}}$ – сопротивление материала пресс-формы

$$Q_2 = (c_H m_H + c_{ПФ} m_{ПФ} + c_{ПП} m_{ПП} k) \Delta T, \quad (8)$$

где $c_H, c_{ПФ}, c_{ПП}$ – теплоемкости соответственно углеродного наполнителя, материала пресс-формы, пенополистирола, Дж/(кг · К); $m_H, m_{ПФ}, m_{ПП}$ – масса соответственно углеродного наполнителя, пресс-формы, навески пенополистирола, кг; k – коэффициент, определяющий степень отличия конечной температуры гранул пенополистирола от температуры токопроводящего наполнителя; ΔT – разность между конечной и исходной температурами системы, К.

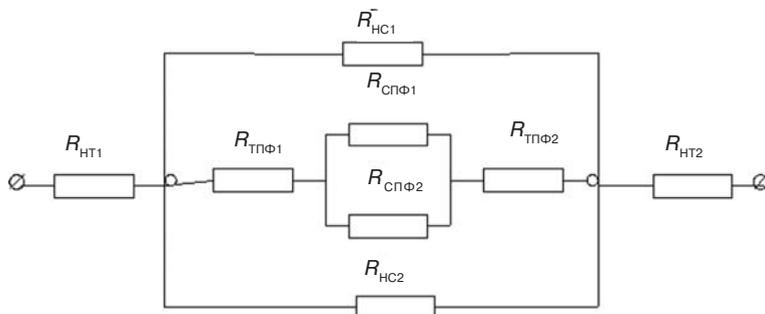


Рис. 5. Эквивалентная электрическая схема электроконтактного способа спекания: R_{HT1} – сопротивление углеродного наполнителя у первого торца контейнера; $R_{ТПФ1}$ – сопротивление материала первого торца пресс-формы; R_{HC1} – сопротивление углеродного наполнителя у первой стенки контейнера; $R_{СПФ1}$ – сопротивление материала первой стенки пресс-формы; $R_{СПФ2}$ – сопротивление материала второй стенки пресс-формы; R_{HC2} – сопротивление углеродного наполнителя у второй стенки контейнера; $R_{ТПФ2}$ – сопротивление материала второго торца пресс-формы; R_{HT2} – сопротивление углеродного наполнителя у второго торца контейнера

Величину ΔT найдем из уравнения теплового баланса, согласно которому $Q_1 = Q_2$

$$\Delta T = \frac{I^2 R_{ОБЩ} t}{c_H m_H + c_{ПФ} m_{ПФ} + c_{ПП} m_{ПП} k}, \quad (9)$$

таким образом, ΔT зависит от длительности и величины пропускаемого тока, материала и массы составных частей электрической цепи. Изменяя любой из приведенных параметров, можно влиять на величину и динамику роста ΔT . К примеру, в нашем случае был рассмотрен вариант схемы, в которой пресс-форма представляла собой токопроводный элемент. В то же время существующие технологические решения в области материаловедения позволяют изготовить пресс-форму из такого диэлектрического материала, как BN (нитрид бора). Изделия, изготовленные из BN, способны сохранять электроизоляционные свойства при высоких температурах. Так, при температуре 2000 К удельное сопротивление BN составляет всего 5 Ом · м [9].

Практическая реализация предложенного способа спекания была осуществлена при изготовлении двух видов моделей (использовались пресс-формы модельного участка), рис. 6. Нужно отметить, что в условиях автоклавного способа они спекались приблизительно одинаковое время. Модель, представленная на фотографии слева, формировалась в течение 70 с, другая – 60 с. Хронометраж процесса позволил установить, что в случае предельно интенсивной производительности автоклава ГК-100 время подачи напряжения на ТЭНы составляет не менее 47 с на каждый цикл спекания. Тогда работа по нагреву воды до парообразования и достижения

им давления 0,185 МПа составит 564 кДж (без учета затрат энергии на нагрев воды в начале смены). Формообразование указанных моделей с помощью электроконтактного способа спекания проходило в течение такого же промежутка времени, однако работа по нагреву сыпучего углеродного наполнителя и пресс-формы в нем составила 11,9 кДж. Переменный ток ($I \approx 19$ А) пропусклся по системе в течение 14 с. Напряжение на зажимах контейнера равнялось 45 В. Существенная разница в затрачиваемой энергии на нагрев в обоих случаях объясняется не только различием теплоемкостей теплопередающих сред, но и разными рабочими объемами, в которых располагались пресс-формы.

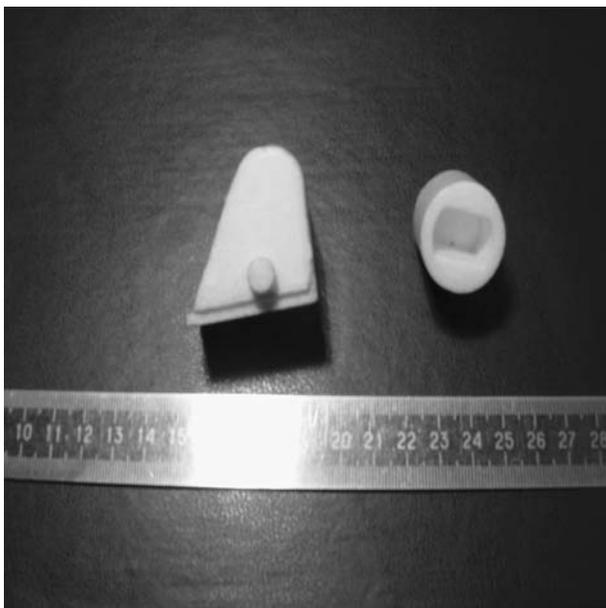


Рис. 6. Фото моделей

Так, в автоклаве ГК-100 объем камеры составляет 10^8 мм³, объем контейнера для электроконтактного способа был равен $2,04 \cdot 10^5$ мм³. Таким образом, соотношение “рабочий объем спекания-объем пресс-формы” в условиях спекания в ГК-100 обеих приведенных моделей составлял 1797,37:1 и 998,54:1 соответственно. В электроконтактном способе, позволяющем легко варьировать размеры рабочей области, указанное соотношение было иным – 3,66:1 и 2,03:1 соответственно.

Учитывая результаты экспериментальных исследований, необходимо отметить следующее. Процесс спекания модели, согласно предложенному способу, осуществляется за счет передачи тепла через стенки пресс-формы теплопроводностью. Следовательно, с увеличением толщины стенки модели будет снижаться качество спекания ее внутренних слоев. В данном случае модель получается качественной, если при диаметре исходных гранул 0,4-0,6 мм толщина стенки не превышает 20 мм. Вместе с тем, разработанный способ имеет ряд преимуществ по сравнению как с автоклавным, так и с ванным способами:

- экономия электроэнергии, поскольку теплоемкость графита (керн) в 5,6 раза меньше теплоемкости воды;

- экономия расходных материалов, в данном случае воды, которая в электроконтактном способе не используется;

- модель после извлечения из технологической камеры получается сухой; электроконтактный способ, в отличие от ванного спекания, позволяет повысить температуру рабочей теплопередающей среды (графита) до температуры 120-130 °С, то есть температуры максимальной пластической деформации пенополистироловых гранул;

- оснастка, оборудование для данного способа производства ГМ отличаются простотой, имеется возможность для каждого типоразмера пресс-формы применять свою технологическую камеру спекания, то есть для меньшей пресс-формы используется меньшая камера, для большей – соответственно большая;

- повышается безопасность работы с оборудованием вследствие отсутствия избыточного давления рабочей среды.



Список литературы

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. *Кирпиченков В. П.* Технологический процесс литья по газифицируемым моделям. – М.: НИИмаш, 1971. – 100 с.
5. *Тупчиенко В. И., Мандрик Е. А., Шеховцова Л. С.* Способ формования моделей из пенополистирола в паровом потоке // Литье по газифицируемым моделям. – Киев: ИПЛ АН Украины, 1979. – С. 126-129.
6. *Мандрик Е. А.* Новые направления в технологии точного литья с применением пенополимеров: Дис. ... д-ра техн. наук. – Краматорск, 1996. – 254 с.
7. *Яковишин О. А.* Новый технологический процесс изготовления газифицируемых моделей для литейного производства: Тез. докл. // Новітні матеріали та технології. – Киев: ИМФ НАНУ, 2006. – С. 129.
8. Пат. 82444 UA, МПК В29С 33/00. Спосіб формування виробів / О. А. Яковишин. – Опубл. 10.04.08, Бюл № 7.
9. *Лутков А. И.* Тепловые и электрические свойства углеродных материалов. – М.: Металлургия, 1990. – 176 с.
10. *Хольм Р.* Электрические контакты. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. – 464 с.
11. *Лакомский В. И.* Постоянная Лоренца углеродного материала катодных блоков алюминиевого электролизера // Пробл. спец. электрометаллургии. – 1998. – № 3. – С. 57-62.
12. *Лакомский В. И.* Математическая модель расчета удельного электрического сопротивления зернистого термоантрацита в зависимости от его фракционного состава // Современная электрометаллургия. – 2003. – № 3. – С. 48-51.
13. *Быковец В. В., Лакомский В. И.* Удельное электрическое сопротивление термоантрацита // Там же. – 2003. – № 4. – С. 49-51.
14. *Быковец В. В., Лакомский В. И., Кириленко В. П.* Удельное электрическое сопротивление кускового термоантрацита в тонком слое // Там же. – 2004. – № 1. – С. 47-49.
15. *Лакомский В. И., Быковец В. В.* О контактном нагреве термоантрацита в электрокальцинаторе // Цв. металлы. – 2004. – № 1. – С. 52-54.
16. *Лакомский В. И., Григоренко Г. М.* Особенности нагрева термоантрацита в электрическом поле переменного тока // Современная электрометаллургия. – 2004. – № 3. – С. 53-55.
17. *Лакомский В. И., Лебедев В. А.* Зависимость контактного электрического сопротивления термоантрацита от температуры и давления // Там же. – 2004. – № 4. – С. 46-48.
18. *Лакомский В. И.* Вольтамперная характеристика термоантрацитовых контактов // Там же. – 2004. – № 4. – С. 48-51.
19. *Лакомский В. И., Цыбулькин Г. А.* Аналитическая модель удельного сопротивления электропроводного сыпучего материала // Там же. – 2005. – № 1. – С. 46-49.
20. *Петров Б. Ф.* Дросселирование потока угольной шихты в электрокальцинаторе // Там же. – 2005. – № 1. – С. 49-54.
21. *Лакомский В. И., Кутузов С. В.* О температурной зависимости электросопротивления термоантрацита // Там же. – 2006. – № 1. – С. 41-44.
22. *Лакомский В. И.* Зависимость удельного электрического сопротивления дробленого термоантрацита от давления // Доп. Національної академії наук України. – 2006. – № 4. – С. 96-103.
23. *Патон Б. Е., Лакомский В. И.* Производство электродного термоантрацита в электропечах шахтного типа // Цв. металлы. – 2008. – № 1. – С. 55-60.
24. *Лакомський В. Й.* Явище електроконтактної пам'яті термоантрациту // Доп. Національної академії наук України. – 2008. – № 12. – С. 88-91.

Поступила 19.03.2010