

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КАРБИДИЗАЦИИ КОМПОЗИЦИЙ С УЧАСТИЕМ ДИОКСИДА ТИТАНА

Ю. Т. Панов, Е. В. Ермолаева, В. Т. Земскова, А. В. Костаков

*ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича
Столетовых» (ВлГУ), г. Владимир*

Рецензент д-р техн. наук, профессор В. П. Легаев

Ключевые слова и фразы: градиент содержания карбида титана; градиент температуры; карбидизация; математическая модель; оптимизация; пенокарбиды; скорость нагрева.

Аннотация: Рассмотрен алгоритм расчета параметров процесса карбидизации изделий на основе фенолформальдегидной смолы, углеродных микросфер и диоксида титана в форме плоской пластины. В отличие от ранее разработанных, данный алгоритм позволяет произвольно задавать начальный состав композиции, что значительно расширяет возможности практического применения.

Пенокарбиды являются наиболее перспективными современными теплоизоляционными материалами, поскольку могут работать в агрессивных средах при температурах до 3000 К. Процесс получения пенокарбидов предусматривает термообработку синтактных пенопластов на основе фенолформальдегидной смолы (ФФС), углеродных микросфер и оксидов металлов в виде готовых изделий (карбидизацию). Из-за низкой теплопроводности материала в изделии возникает значительный градиент температуры, что увеличивает вероятность растрескивания и получения некачественных изделий. Поэтому методы математического моделирования нашли широкое применение для расчета технологических параметров процесса карбидизации.

Ранее были разработаны математические модели кинетики карбидизации [1] и процесса получения изделий из пенокарбида титана различных геометрических форм [2], адекватность которых установлена в узком интервале варьирования начального состава композиции и геометрических

Панов Юрий Терентьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Химические технологии», e-mail: tpp_vlgu@mail.ru; Ермолаева Елена Вадимовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химические технологии»; Земскова Валентина Тимофеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химические технологии»; Костаков Алексей Владимирович – аспирант кафедры «Химические технологии», ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ), г. Владимир.

размеров изделия (в соответствии с имеющимися экспериментальными данными). Использование модели для изделия в форме плоской пластины дает возможность рассчитать при заданной скорости нагрева в печи карбидизации изменение температуры и содержания карбида титана по толщине образца (основному геометрическому размеру), а также возникающего в изделии температурного градиента.

Скорость нагрева изделия, время выдержки при постоянной температуре и полное время карбидизации являются основными технологическими параметрами процесса получения изделий из пенокарбида титана. При определении скорости нагрева изделия целесообразно использовать значение максимального температурного градиента:

проведенные исследования показали, что он не должен превышать 800 К/м. Для оценки времени карбидизации можно использовать значение градиента содержания карбида титана в конце процесса, так как реакция протекает медленнее, чем происходит выравнивание температуры по слоям (рис. 1). Здесь и далее на рис. 2: начальный состав композиции: титан – 76,125 масс. ч.; углеродные микросферы – 7,250 масс. ч.; ФФС – 16,625 масс. ч.; толщина пластины – 0,05 м.

Установлено, что возникающий при термообработке градиент температуры зависит от начального состава композиции, толщины и скорости нагрева пластины. По результатам обработки данных машинного эксперимента с использованием разработанной MATLAB-программы искомая зависимость представляет собой уравнение регрессии в виде полного квадратного полинома:

$$GRT = 996,51 + 428,31x_1 + 711,08x_2 - 100,37x_3 - 202,72x_4 + 229,71x_1x_2 - 22,80x_1x_3 - 84,64x_1x_4 - 24,14x_2x_3 - 114,14x_2x_4 - 104,14x_3x_4 + 227,95x_1^2 + 310,45x_2^2 - 724,82x_3^2 + 45,73x_4^2,$$

где GRT – градиент температуры, К/м; x_1, x_2, x_3, x_4 – безразмерные значения входных переменных: x_1 – толщина пластины; x_2 – скорость нагрева; x_3 – содержание титана; x_4 – содержание углеродных микросфер.

Безразмерные значения связаны с размерными входными переменными соотношениями:

$$x_1 = \frac{X_1 - 0,05}{0,02}; \quad x_2 = \frac{X_2 - 200}{150}; \quad x_3 = \frac{X_3 - 76,25/48}{6,125/48}; \quad x_4 = \frac{X_4 - 7,25/12}{4,25/12},$$

где X_1 – толщина пластины в интервале от 0,03 до 0,07 м; X_2 – скорость нагрева изделия в интервале от 50 до 350 К/ч; X_3 – содержание титана

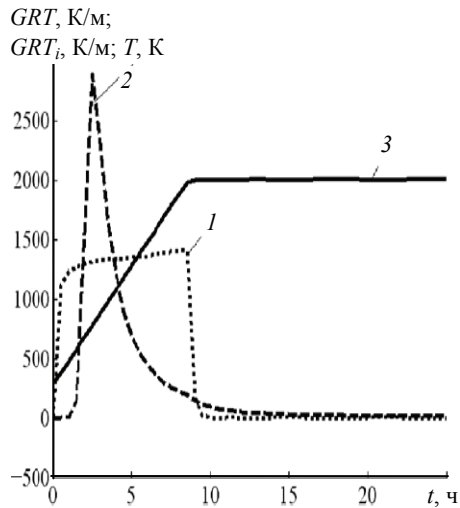


Рис. 1. Изменение технологических параметров в процессе карбидизации при скорости нагрева 0,055 К/с:
1 – градиента температуры, К/м;
2 – градиента содержания карбида титана, $\times 10^3$ моль/м; 3 – температура в печи карбидизации, К

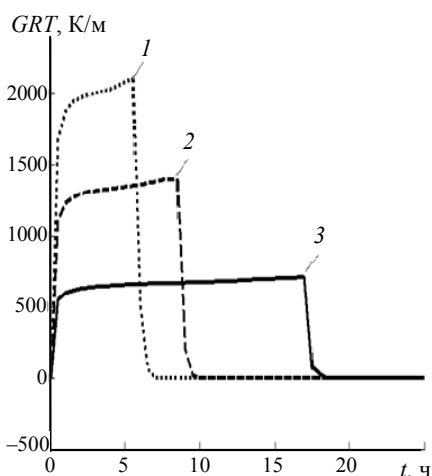


Рис.2. Зависимость градиента температуры от времени при различных скоростях нагрева изделия, K/ч:
1 – 100; 2 – 200; 3 – 300

в интервале от 1,5 (70,0 масс. ч.) до 1,7 моль (82,25 масс. ч.); X_4 – содержание углерода в интервале от 0,25 (3,0 масс. ч.) до 0,96 моль (11,5 масс. ч.).

Влияние скорости нагрева на градиент температуры представлено на рис. 2. В соответствии с этим была сформулирована задача оптимизации технологического режима карбидизации для изделия в форме плоской пластины: найти такую скорость подъема температуры в печи, при которой возникающий в изделии градиент температуры не превышал бы предельно допустимого значения с заданной степенью точности (конечная температура в печи карбидизации по данным предыдущих исследований со-

ставил 1973 K). Разработан алгоритм и MATLAB-программа для расчета технологических параметров карбидизации изделий в форме пластины известного интервала варьирования начального состава композиции и толщины изделия.

Для расчета технологических параметров карбидизации изделий произвольного начального состава необходимо исследование влияние начального состава композиции на теплофизические характеристики материала: теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность.

Температуропроводность связана с теплопроводностью, плотностью и теплоемкостью материала следующим выражением

$$a = \lambda / \rho c_p, \quad (1)$$

где a – температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$; λ – теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_p – теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

По результатам обработки экспериментальных данных с использованием разработанной MATLAB-программы получены:

– зависимость отношения теплопроводности к плотности от начального состава

$$\lambda/\rho = 2,09 \cdot 10^{-2} - 5,19 \cdot 10^{-4} x_1 - 2,88 \cdot 10^{-4} x_2 + 2,56 \cdot 10^{-6} x_1 x_2 + 3,29 \cdot 10^{-6} x_1^2 + 5,01 \cdot 10^{-6} x_2^2,$$

где λ – теплопроводность пенокарбида титана, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; x_1 – содержание титана, моль; x_2 – содержание углеродных микросфер, моль;

– зависимость теплоемкости пенокарбида титана (с учетом газовой фазы) от температуры

$$c_p = 4,42 \cdot 10^{-14} \cdot T^5 - 3,70 \cdot 10^{10} \cdot T^4 + 1,16 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 - 1,71 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 12,28 \cdot T + 747,57,$$

где c_p – теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; T – температура в печи карбидизации, K;

– зависимость температуропроводности пенокарбида титана от исходного состава и температуры, рассчитанная из соотношения (1).

Алгоритм расчета технологических параметров карбидизации, дополненный математическим описанием зависимости температуропроводности пенокарбида титана от исходного состава и температуры в печи, может быть использован для расчета технологических параметров карбидизации композиций произвольного начального состава.

Алгоритм состоит из трех частей (рис. 3): управляющей (блоки 1 и 5), формирования критерия оптимальности (блоки 2 и 4) и формирования правых частей уравнений, составляющих математическое описание кинетики карбидизации изделия (блок 3).

Блок 1 – блок запрашиваемых данных (начальные условия), в который входят толщина пластины, содержание титана и углеродных микросфер, температуропроводность, как функция начального состава композиции и температуры, начальная и конечная температуры карбидизации, заданный температурный градиент.

Блок 2 – блок поиска скорости нагрева образца, где использовался оператор `fminbnd`, который, ссылаясь на файл формирования критерия оптимальности, позволяет находить минимум функции одной переменной в заданном интервале.

Блок 3 – блок решения дифференциальных уравнений математического описания процесса карбидизации. В качестве решателя дифференциальных уравнений использовался многошаговый метод переменного порядка (`ode15s`).

Блок 4 – блок нахождения максимального градиента температуры, не превышающего заданное значение, полного времени карбидизации и времени выдержки образца.

Блок 5 – блок выходных данных включает рассчитанные технологические параметры карбидизации – скорость нагрева, максимальный градиент температуры, время достижения максимального градиента, время нагрева и выдержки образца, а также графический материал, отражающий изменение значения градиента температуры и градиента содержания карбида титана в процессе карбидизации.

По данному алгоритму разработана MATLAB-программа, работу которой иллюстрирует следующий пример.

Для пластины толщиной 0,05 м следующего состава: 82,25 масс. ч. титана, 7,5 масс. ч. углеродных микросфер и 10,25 масс. ч. фенолоформальдегидной смолы программой была рассчитана скорость нагрева изделия, равная 154,4 К/ч. При данной скорости нагрева максимальный температурный градиент будет достигнут за 10,5 ч и не превысит заданного значения (800 К/м) – составит 799,9 К/м, время достижения максимального градиента по содержанию карбида титана сос-

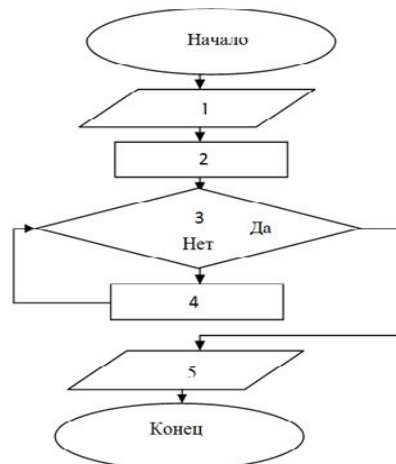


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета технологических параметров процесса карбидизации

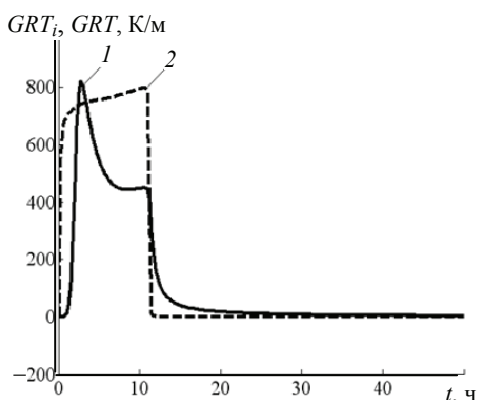


Рис. 4. Изменение градиента содержания карбида титана, 1, $\times 10^3$ моль/м, и градиента температуры, 2, К/м, в процессе карбидизации

му как основу для разработки программы расчета режимных параметров процесса получения изделий из пенокарбида титана других форм.

Список литературы

1. Математическое моделирование кинетики процесса получения пенокарбидов титана / Н. Н. Барабанов [и др.] // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2009. – Т. 52, № 5. – С. 117 – 119.

2. Моделирование и расчет оптимальных режимов получения изделий различных геометрических форм из пенокарбидов / Ю. Т. Панов [и др.] // Вопр. оборонной техники. Композиц. неметалл. материалы в машиностроении. – 2006. – Вып. 3(144)–4(145). – С. 22 – 26.

References

1. Barabanov N.N., Zemskova V.T., Panov Yu.T., Vas'kova N.G. *Izvestiya VUZov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2009, vol. 52, no. 5, pp. 117-119.

2. Panov Yu.T., Monyakov A.N., Barabanov N.N., Zemskova V.T. *Voprosy obronnoi tekhniki. Kompozitsionnye nemetallicheskie materialy v mashinostroenii*, 2006, ussue 3(144)-4(145), pp. 22-26.

Optimization of Technological Process of Compositions Carbide with Titanium Dioxide

Yu. T. Panov, E. V. Yermolaeva, V. T. Zemskova, A. V. Kostakov

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir

Key words and phrases: carbide foam; carbidization; heating speed; mathematical model; optimization; temperature gradient; titanium carbide gradient.

Abstract: The paper studies an algorithm for calculation of carbidization process parameters of products based on phenol formaldehyde resin, carbon microspheres and titanium dioxide in the form of a flat plate. Unlike the previously developed algorithms, this one permits to set randomly the initial structure of the composition. This expands considerably the possibilities of practical application of the algorithm.

© Ю. Т. Панов, Е. В. Ермолаева, В. Т. Земскова, А. В. Костаков, 2015