



Technological aspects of temperature processing of articles of carbon are considered and construction of thermal installation is offered.

Д. В. МЕНДЕЛЕВ, П. Э. РАТНИКОВ, БНТУ

УДК 620.9

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТАНОВКАХ. СООБЩЕНИЕ 1. КОНСТРУКЦИЯ И ТЕПЛОВАЯ РАБОТА УСТАНОВОК

В настоящее время в промышленности (авиастроение, машиностроение и т. д.) отмечаются тенденции по переходу от производства деталей и отдельных узлов из классических конструкционных материалов (сталь, алюминий, различные сплавы) к композитным конструкционным материалам, и в первую очередь, к углепластикам.

Объем мирового рынка углеродного волокна в 2010 г. составил более 25,2 млрд. долл. США, что соответствует 48,6 тыс. т в натуральном выражении. Рыночная стоимость углеродного волокна составляет в среднем 100 евро/кг (при себестоимости производства в среднем 50 евро/кг). Следует отметить, что рынок углепластика растет ежегодно на 25%, при этом максимальный прирост потребления намечается в следующих отраслях: альтернативной энергетике (лопасти ветрогенераторов) – 30%; аэрокосмической отрасли – 20% (основные потребители Boeing и Airbus); строительстве – 15%; производстве спортивного инвентаря – 7%; в автомобиле- и судостроении.

Углепластики (карбопластики) представляют собой полимерные композиционные материалы из переплетенных нитей углеродного волокна, расположенных в матрице из полимерных (например, эпоксидных) смол, плотность материала – от 1450 кг/м³. Материалы отличаются высокой прочностью, жесткостью и малой массой, часто прочнее стали, но гораздо легче (по удельным характеристикам превосходят высокопрочную сталь, например 25ХГСА). Основной составляющей углепластика являются нити углерода (диаметром около 0,005–0,010 мм), из которых сплетают ткань. Для придания еще большей прочности ткани из нитей углерода кладут слоями, каждый раз меняя угол направления плетения.

Нити углерода обычно получают термической обработкой химических или природных органических волокон, при которой в материале волокна остаются главным образом атомы углерода. Температурная обработка состоит из нескольких этапов. Первый из них представляет собой окисление исходного (полиакрилонитрильного, вязкого) волокна на воздухе при температуре 250 °С в течение 24 ч. В результате окисления образуются лестничные структуры. После окисления следует стадия карбонизации, включающая нагрев волокна в среде азота или аргона при температурах от 800 до 1500 °С. В результате карбонизации происходит образование графитоподобных структур. Процесс термической обработки заканчивается графитизацией при температуре 1600–3000 °С, которая также проходит в инертной среде. В результате графитизации количество углерода в волокне доводится до 99%.

Детали из карбона превосходят по прочности детали из стекловолокна, но при этом обходятся значительно дороже аналогичных деталей из стекловолокна. Дороговизна карбона вызвана прежде всего более сложной технологией производства и большей стоимостью производных материалов. Например, для проклейки слоев используются более дорогие и качественные смолы, чем при работе со стеклотканью, а для производства деталей требуется более дорогое оборудование (к примеру, такое, как автоклав, рис. 1).

В данной статье рассмотрены теплотехнические аспекты температурной обработки изделий из карбона и предложена конструкция тепловой установки. В качестве базисного оборудования рассмотрен автоклав диаметром 2 м и длиной 4 м, выполненный из конструкционной стали 15К.



Рис. 1. Общий вид автоклава

Целью расчетов являлся подбор типов нагревателей, их количества и оптимального места их расположения, разработка конструкции теплозащитной футеровки, расчет энергетических затрат.

В качестве нагревателей предложено использовать нагреватели из графита марок ГМЗ, которые могут работать при температуре 2000 – 2500 °С в вакууме до 10⁻² мм ртутного столба. Размеры нагревателей: диаметр 200 мм, длина 1,5 м (исходя из геометрических соображений).

На первом этапе при расчете количества нагревателей и их месторасположения критерием оптимизации было получение равномерного температурного поля внутри камеры автоклава. При этом термическое сопротивление футеровки автоклава было подобрано таким образом, чтобы на внутренней поверхности металлоконструкций автоклава температура соответствовала рабочему диапазону температур конструкционных сталей.

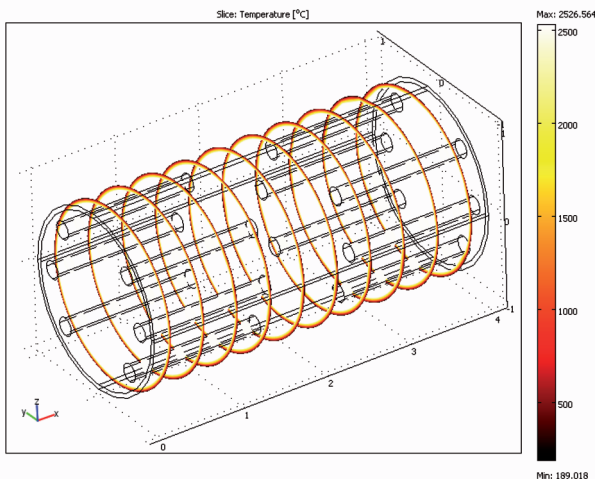


Рис. 2. Оптимальная схема расположения (объемный вид) нагревателей и температура футеровки

Для этого с помощью метода конечных элементов [1–3], хорошо зарекомендовавшим себя при решении задач теплопереноса в промышленных тепловых агрегатах, например [4–6], было проведено моделирование тепловой работы автоклава. Тепловой инерцией нагреваемых материалов (изделия из карбона) пренебрегаем в связи с незначительностью их массы и относительной поверхности.

Математическая модель имеет вид

$$\begin{cases} \rho(T)c_p \frac{\partial T_i}{\partial t} + \nabla(-k(T)\nabla T_i) = Q_j, \\ T_0 = T_i(t_0), \\ -n(-k(T)\nabla T_i) = \varepsilon(G_i - \sigma T_i^4), \\ (1 - \varepsilon)G_i = J_{0i} - \varepsilon\sigma T_i^4, \end{cases}$$

где $k(T)$ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); c_p – изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К); T_i – температура i -й границы, К; $n(-k(T)\nabla T_i)$ – нормальная составляющая потока теплопроводности от i -й границы, Вт/м² ($i = j$ – поверхность нагревателя, $i \neq j$ – поверхность футеровки); $\rho(T)$ – плотность, кг/м³; Q – источник теплоты, Вт/м³; ε – степень черноты заготовки; σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴); $(1 - \varepsilon)G_i$ – плотность отраженного излучения i -й границы заготовки, Вт/м²; J_{0i} – плотность эффективного излучения i -й границы заготовки, Вт/м²; $\varepsilon\sigma T_i^4$ – плотность собственного излучения i -й границы заготовки, Вт/м²; εG_i – плотность поглощенного излучения заготовкой через i -ю границу, Вт/м².

Результаты расчетов по определению места положения нагревателей и температуры по сечению автоклава (при температуре рабочей камеры 2500 °С) приведены на рис. 2, 3. При этом номинальная мощность нагревателей составит по 32 кВт на каждом.

Как видно из рис. 4, равномерность температур на внутренних поверхностях автоклава (рис. 4, а)

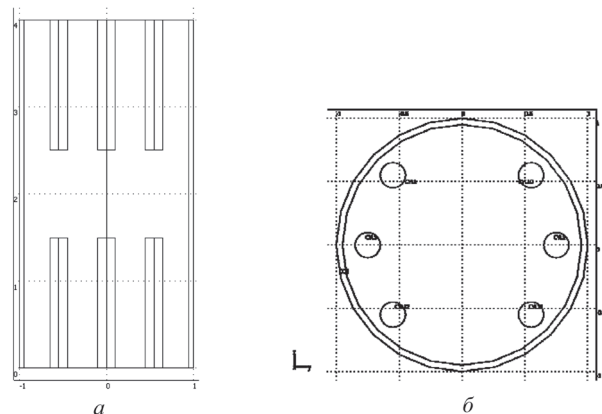


Рис. 3. Оптимальная схема расположения (вид сверху): а – вид сверху; б – поперечный разрез

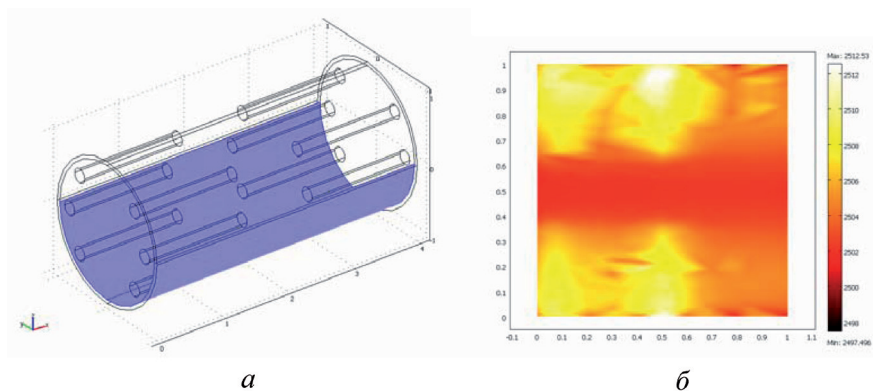


Рис. 4. Распределение температуры по внутренней рабочей поверхности автоклава: *а* – выбранная поверхность автоклава; *б* – температурное поле поверхности

достаточно высокая (рис. 4, *б*) и максимальная раз-
ница температур не превышает 14 °С.

Таким образом, в данной статье приведена
конструкция агрегата для высокотемпературной

обработки композитных материалов из углепла-
стика, произведен выбор нагревательных эле-
ментов и определено их оптимальное распо-
ложение.

Литература

1. Г а л л а г е р, Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер; пер. с англ. М.: Мир, 1984.
2. Д е к л у, Ж. Метод конечных элементов / Ж. Деклу; пер. с франц. М.: Мир, 1976.
3. З е н к е в и ч, О., М о р г а н, К. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган; пер. с англ. М.: Мир, 1986.
4. Математическое моделирование процессов радиационно-конвективного теплообмена при нагреве стальных заготовок в методических проходных печах / И. А. Трусова, Д. В. Менделев, П. Э. Ратников // *Литье и металлургия*. 2010. № 3. (Спецвыпуск). С. 169–172.
5. Математическое моделирование теплообменных процессов в топливных нагревательных печах камерного типа / И. А. Трусова, П. Э. Ратников, Д. В. Менделев, С. В. Корнеев // *Литье и металлургия*. 2010. № 4. С. 194–198.
6. Математическое моделирование и оптимизация способов нагрева заготовок в камерных печах / И. А. Трусова, П. Э. Ратников, Д. В. Менделев // *Литье и металлургия*. 2010. № 4. С. 190–193.