

УДК 004.942

Разработка математической модели заготовительного производства углеродистых композитных материалов

Хухрянский Дмитрий Александрович

Лагута Виктор Степанович (научный руководитель)

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Описана математическую модель для оптимизации производства процесса, включая этапы нагрева и охлаждения. Модель учитывает наиболее важные параметры, такие как темпы нагрева и охлаждения, время выдержки, максимальный темп, партийный объем, стоимость энергии, доступное рабочее время, энергоемкость оборудования и стоимость обслуживания в цикле. По ней рассчитываются значимые показатели, такие как общее время одного производственного цикла, количество циклов в день, общий объем продукции, энергопотребление и себестоимость продукции. Модель направлена на повышение производительности, снижение энергозатрат и оптимизацию финансовых расходов, что особенно актуально для отраслей с тепловыми процессами.

Ключевые слова: математическое моделирование, углеродистые композитные материалы, технологический процесс, оптимизация параметров, заготовительное производство

Введение. В условиях стремительного развития высокотехнологичных отраслей промышленности, таких как авиация, космонавтика, автомобилестроение и энергетика — возрастает потребность в легких, прочных и надежных конструкционных материалах. Одним из наиболее перспективных классов материалов, отвечающих этим требованиям, являются углеродистые композиционные материалы — это современные многокомпонентные материалы, основой которых являются углеродные волокна, армирующие полимерную, металлическую или керамическую матрицу. Благодаря сочетанию высокой прочности, легкости и устойчивости к воздействию агрессивных сред, они нашли широкое применение.

Заготовительное производство и оборудование. Заготовительный этап изготовления углеродистых композитов играет ключевую роль в формировании качественных характеристик конечного изделия. В заготовительном производстве используется следующее оборудование: пеканизатор, карбонизатор и установка высокотемпературной обработки (ВТО) [1, 2].

Пеканизатор — это специализированное технологическое оборудование, применяемое в производстве УКМ для пропитки армирующих волокон пеком — углеводородным связующим, получаемым как побочный продукт переработки нефти или каменноугольной смолы. Процесс пропитки пеком называется пеканизацией.

Карбонизатор — это промышленное термическое устройство, предназначенное для проведения карбонизации — процесса термического разложения пека в инертной или восстановительной атмосфере с образованием углеродистой структуры. Карбонизация позволяет удалить летучие компоненты из заготовки и сформировать прочный углеродный каркас.

Установка ВТО — это промышленное оборудование, предназначенное для проведения высокотемпературной обработки углеродных заготовок, в первую очередь для графитации или повышения степени кристалличности углеродной матрицы.

В производстве углеродистых композиционных материалов пеканизатор, карбонизатор и установка ВТО работают в последовательном технологическом цикле, который повторяется многократно до достижения требуемой плотности и структуры материала. Схема изменения материи от заготовки до готового изделия представлена на рис. 1.

После каждого цикла происходит проверка плотности на достижение требуемого значения. Данное значение зависит от выбранных элементов и требований к материалу.

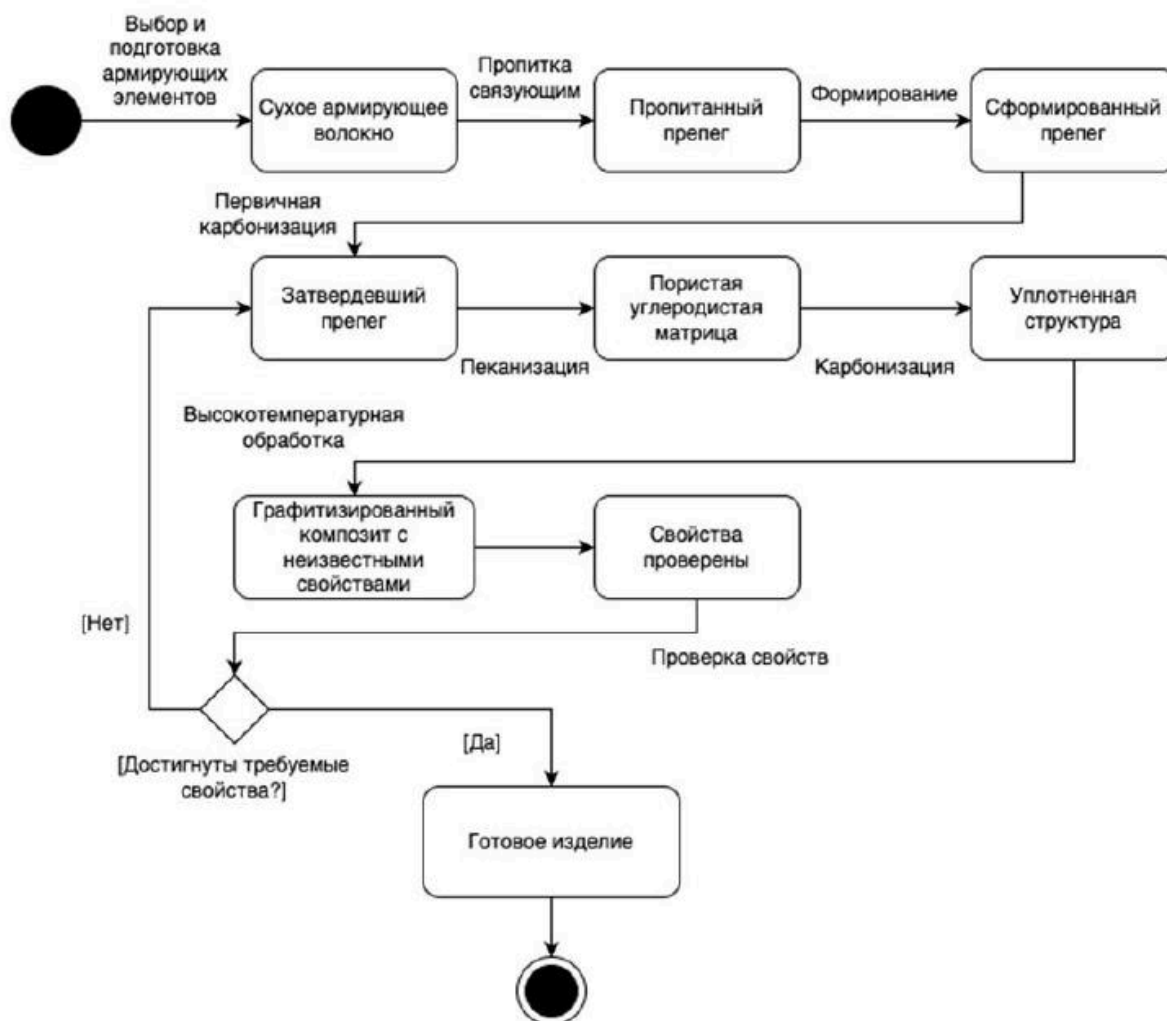


Рис. 1. Схема изменения материи

Проблема и цель. Проблема заключается в сложности управления и оптимизации заготовительного этапа производства УКМ, обусловленной многостадийностью технологического процесса, его высокой энергоемкостью и трудоемкостью. На этапе пропитки, карбонизации и высокотемпературной обработки происходят сложные физико-химические преобразования, влияющие на качество и характеристики конечного материала. Ввиду высокой стоимости сырья, оборудования и энергоресурсов, неэффективные производственные режимы приводят к значительным технологическим потерям и удорожанию продукции. Целью исследования является разработка математической модели, описывающей процессы заготовительного этапа производства УКМ для проведения анализа и оптимизацию ключевых технологических параметров.

Математическая модель. Для заготовительного производства УКМ наиболее обоснованным и универсальным является подход на основе математического моделирования на уравнениях, полученных и используемых ранее на производстве. Такой подход позволяет формализовать основные этапы технологического цикла в виде взаимосвязанных математических выражений, проводить численные эксперименты при различных условиях без необходимости физического воспроизведения процесса и получать прогнозные оценки производительности, энергоемкости и себестоимости в рамках единой модели.

Связь разработанной математической модели с производством представлена на рис. 2.

На рис. 3 представлена архитектура математической модели. Функции более низкого уровня входят как аргументы в функции более высокого уровня.

Первый уровень.

Время нагрева. Определяется как отношение максимальной температуры к скорости нагрева

$$f_{th} = \frac{T_{\max}}{r_h}.$$

Время охлаждения. Аналогично рассчитывается через скорость охлаждения

$$f_{tc} = \frac{T_{\max}}{r_c}.$$

Энергетические затраты на нагрев. Зависит от объема партии, температуры и энергоемкости оборудования

$$f_{eh} = E_e \cdot T_{\max} \cdot V_b.$$

Второй уровень.

Время полного цикла. Суммирует нагрев, выдержку и охлаждение

$$f_{tmc} = f_{th} + t_{hold} + f_{tc}.$$

Общие энергетические затраты на цикл. Учитывают затраты на нагрев и охлаждение

$$f_{ce} = f_{eh} \cdot C_e.$$

Третий уровень.

Количество циклов за сутки. Определяет, сколько полных циклов возможно при заданном рабочем времени

$$f_{c/d} = \frac{f_{tmc}}{T_{work} \cdot 60}.$$

Общая стоимость одного цикла. Включает энергетические и эксплуатационные затраты

$$f_{total} = f_{ce} + C_1.$$

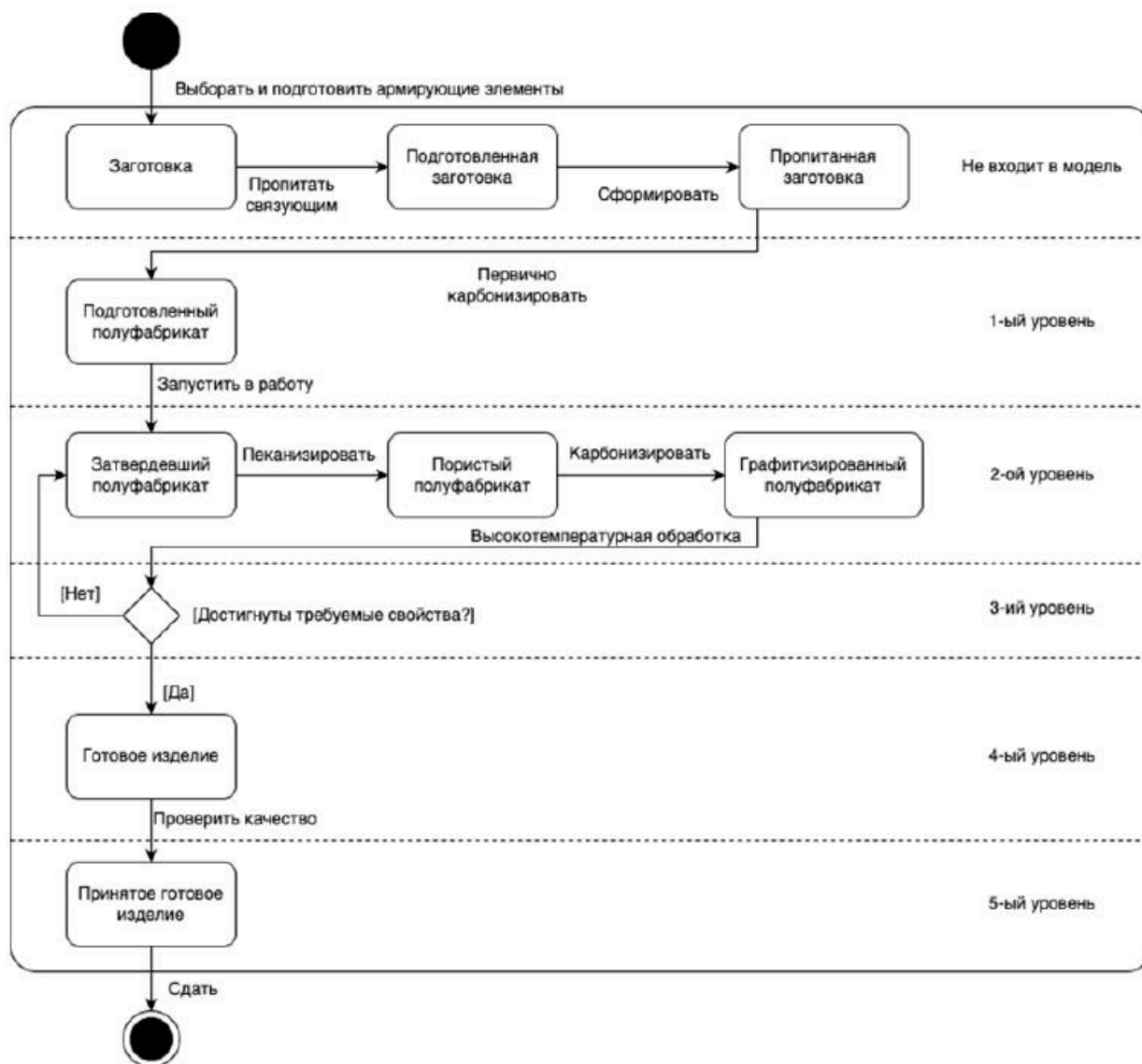


Рис. 2. Связь математической модели с производством

Четвертый уровень.

Производственная мощность. Рассчитывает общий объем продукции за сутки

$$g_d = f_{\frac{c}{d}} \cdot V_b.$$

Общая стоимость производства за сутки. Учитывает стоимость всех циклов

$$F_u = f_{\frac{c}{d}} \cdot f_{total}.$$

Пятый уровень.

Себестоимость единицы продукции. Рассчитывается как отношение общей стоимости к объему продукции

$$F_u = \frac{F_c}{g_d}.$$

Для определения конца обработки в модели используется вспомогательная функция изменения плотности по прошествии одного цикла:

$$\Delta\rho = k \cdot \left(\frac{T_{\max}}{1500} \right).$$

Для определения зависимости себестоимости от параметров выбран метод Монте-Карло [3, 4] с 1000 итераций. Для параметров были приняты следующие интервалы: $r_h \in (5; 20)$; $t_{hold} \in (600; 2400)$; $r_c \in (5; 20)$; $T_{\max} \in (1000; 2000)$; $V_b \in (2; 10)$; $C_e \in (1; 50)$; $T_{work} \in (4; 24)$; $E_e \in (20; 100)$; $C_1 \in (20; 100)$ (рис. 4).

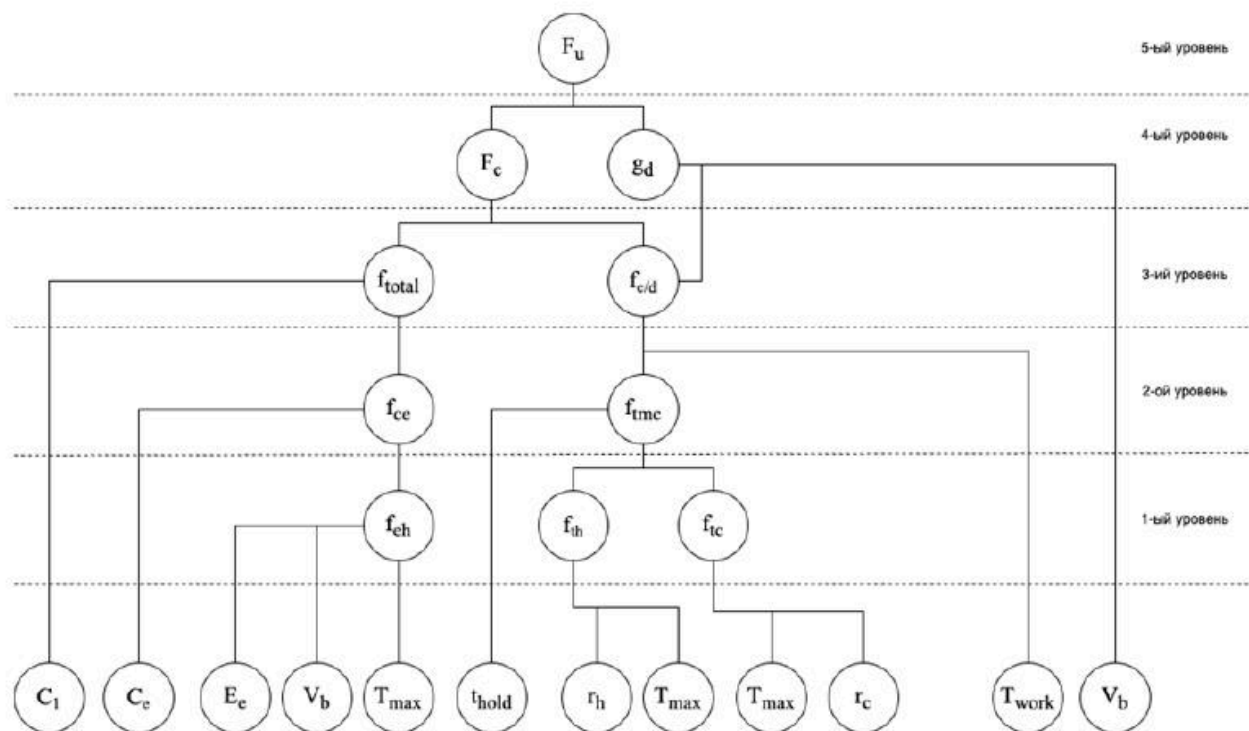


Рис. 3. Архитектура математической модели

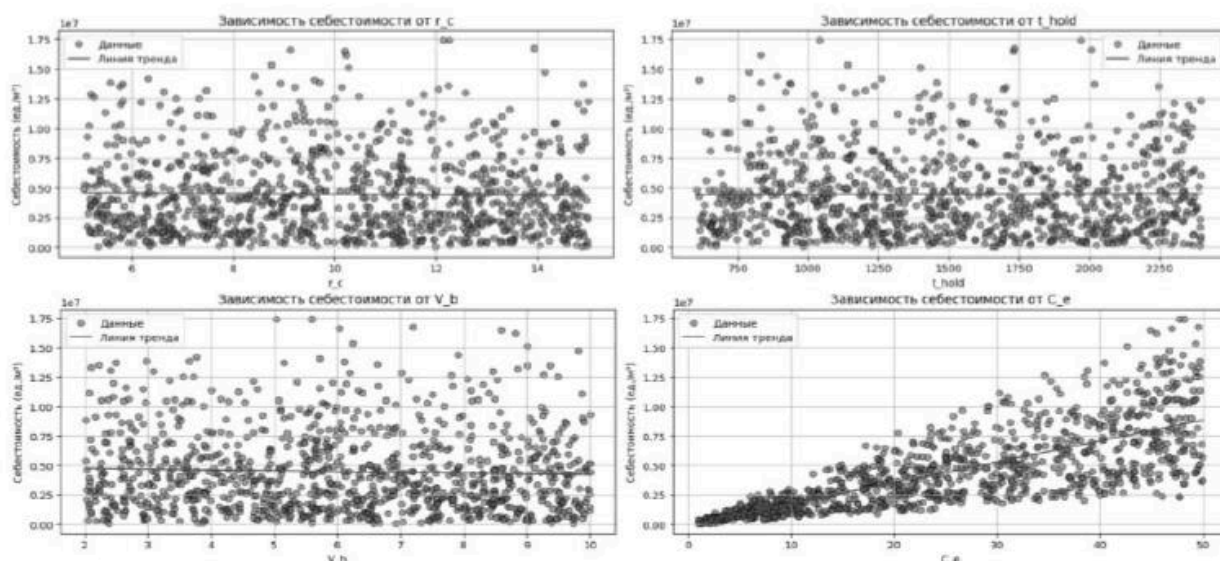


Рис. 4. Зависимость себестоимости от параметров

Заключение. В данной работе описана разработанная математическая модель, описывающая цикл заготовительного производства УКМ, включающий стадии пеканизации, карбонизации и высокотемпературной обработки.

Показана зависимость себестоимости от максимальной температуры, стоимости энергии и энергоемкости оборудования, а также слабая обратная зависимость от объема партии, что отражено на рис. 4. Применение модели в сочетании с методами оптимизации позволит вырабатывать оптимальные стратегии управления производством УКМ с минимальными затратами и максимальной эффективностью [5].

Литература

- [1] Mallick P.K. Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design. Boca Raton, CRC Press, 2007, 638 p.
- [2] Chawla K.K. Composite materials: science and engineering. New York, Springer, 2012, 542 p.
- [3] Карпенко А.П. *Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 446 с.
- [4] Lawson J. Design and analysis of experiments with R. Boca Raton, CRC Press, 2014, 620 p.
- [5] Barbero E.J. Introduction to composite materials design. Boca Raton, CRC Press, 2010, 562 p.

Development of a mathematical model for the preform manufacturing process of carbon - based composite materials

Khukhrianski Dmitri Alexandrovich

Laguta Victor Stepanovich (*scientific advisor*)

BMSTU, Moscow, Russia

The presented work describes a mathematical model for optimizing a production process, including the heating and cooling stages. The model takes into account the most important parameters such as heating and cooling rates, holding time, maximum rate, batch volume, energy cost, available working time, equipment energy consumption, and maintenance cost per cycle. It calculates key indicators such as the total time of one production cycle, the number of cycles per day, total production volume, energy consumption, and production cost. The model is aimed at increasing productivity, reducing energy consumption, and optimizing financial expenditures, which is particularly relevant for industries involving thermal processes.

Keywords: mathematical modeling, carbon composite materials, technological process, parameter optimization, preform manufacturing