

Перинский Тарас Викторович – ЗАО «Инновационная Энергетика»; e-mail: info@ipenet.ru; 111116, г. Москва, ул. Красноказарменная, 15; тел.: 84955179416; начальник технического отдела.

Клыкков Александр Валерьевич – инженер технического отдела.

Perinskiy Taras Viktorovich – ZAO «Innovation Power Engineering»; e-mail: info@ipenet.ru; 15, Krasnokazarmennaja street, Moscow, 111116, Russia; phone: +74955179416; chief of technical department.

Klykov Alexander Valerievich – engineer of technical department.

УДК 51-74

П.А. Трофимов

ОСОБЕННОСТИ ВЫДЕЛЕНИЯ СВЯЗУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ В МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Рассмотрена на начальном этапе производства многослойных композиционных материалов обильное выделение связующей массы, которая предназначена для склеивания слоев изделия. Склеивание происходит при достижении изделием заданной температуры полимеризацией связующего. Для получения качественного композиционного материала необходимо процесс изготовления строить в зависимости от особенностей выделения связующего. На процессы изменения количества связующего влияют как минимум два фактора: температура и давление, оказываемое на конструкцию. С их учетом получена математическая модель процесса выделения и предложен способ оценки эффективности промышленного производства для связующей компоненты.

Композиционные материалы; многослойные конструкции; связующее; массовыделение; коэффициент выделения связующего.

P.A. Trofimov

ALLOCATION OF GLUTINOUS MATERIALS IN THE MULTILAYERED STRUCTURES

Glutinous mass is strongly allocated at the initial stage of the production of multilayer composites. It is necessary for the adhesion of composite layers. Adhesion occurs during the polymerization of glutinous mass under the influence of temperature. The manufacturing process should be built depending on the particular allocation of glutinous mass for high-quality composite material. At least two factors (temperature and pressure) affect the amount of glutinous mass. Mathematical model of the allocation is received with their view, and method of estimating of the efficiency of industrial production for linking of layers is offered.

Composite materials; the multilayered structures; glue; the allocation of the mass; coefficient of allocation.

Ежегодно под требованием научно-технического прогресса увеличивается потребность в высокопрочных материалах. Одним из таких материалов являются многослойные композиционные материалы. Процесс их изготовления трудоемок и технически сложен. Рассмотрим один из способов получения таких материалов и произведем оценку эффективности промышленного производства [2] для связующей составляющей многослойной конструкции (МК).

Пусть имеется несколько однотипных пропитанных связующим слоев, свернутых в полую цилиндрическую конструкцию [3, 5]. Эта конструкция в внешней боковой стороны подвергается термическому воздействию и жестко закреплена в форме, с внутренней поверхности на нее оказывается давление. Суть этих опера-

ций заключается в том, что нагрев провоцирует выделение связующей массы, необходимой для склеивания соседних слоев, а давление, оказываемое изнутри, выдавливает ее излишки через внешнюю поверхность конструкции (главным образом через торцы).

Поставим задачу описания данной производственной системы, с точки зрения изменения количества межслоевой связующей массы (см. задачу об остывании в [1]).

1. На процессы движения связующего, должны влиять, как минимум, два фактора: фактор температуры и фактор давления. Для удобства распараллелим эти процессы.

Для температуры предположим следующее. Первое, чем выше температура, тем больше выделяется связующей массы; второе, фактор температуры влияет только на выделение и не влияет на выдавливание излишков связующего; третье, выделение связующего – необратимый процесс, т.е. связующее не может обратно впитываться в слой.

Последнее обстоятельство говорит о том, что разность масс между выделением и заполнением слоев положительна и имеет смысл рассматривать только реальное выделение.

Итак, будем рассматривать процесс изготовления для времени τ , τ изменяется от τ_0 до τ_2 , где τ_0 – начальное время (начало процесса изготовления), τ_2 – конечное время (связующее перестает выделяться). Важен также известный из практики момент времени τ_1 , начиная с которого происходит выделение связующего через поверхность МК. Поэтому целесообразно разделить промежуток $[\tau_0, \tau_2]$ на две части и тем самым построить две модели: одну – для случая $[\tau_0, \tau_1]$, другую – для случая $(\tau_1, \tau_2]$.

2. Первый случай. Для него характерен тот факт, что процесс не зависит от давления p . Пусть температура зависит от времени $t = t(\tau)$, обозначим $t_0 = t(\tau_0)$, $t_1 = t(\tau_1)$, $t_2 = t(\tau_2)$; $m_{сл}(t)$ – масса, оставшегося связующего в слоях изделия при температуре t ; $m_{сл}(t_0)$ – известная начальная масса связующего в слоях, $m_{сл.кр.}$ – минимальная масса связующего в слоях, $m_{полн}(t)$ – полная выделившаяся масса связующего, 0 – межслоевая масса связующего при температуре t , примем, $m(t_0) = 0$, k – коэффициент выделения связующего для слоев.

Для внутрислоевой связующей массы будем отталкиваться от предположения, что чем больше эта масса, тем быстрее она будет убывать из слоев, т.е. для разности некоторых температур $\Delta t = t_b - t_a$ уменьшение массы $\Delta m_{сл}(t)$ будет пропорционально текущей массе без минимальной $m_{сл.кр.}$

$$\Delta m_{сл}(t) = -k(m_{сл.}(t) - m_{сл.кр.})\Delta t$$

или

$$\frac{\Delta m_{сл}(t)}{\Delta t} = -k(m_{сл.}(t) - m_{сл.кр.}).$$

Конечно, массовыделение для t_a , t_b различно, что, однако, разрешается дифференциальным уравнением

$$\frac{dm_{сл}(t)}{dt} = -k(m_{сл.}(t) - m_{сл.кр.}). \quad (1)$$

Объединяя полученные условия, получим математическую модель для первого случая

$$\begin{cases} t = t(\tau), \tau \in [\tau_0, \tau_1], \\ m(t) = m_{\text{полн}}(t), \\ m_{\text{полн}}(t) = m_{\text{сл.}}(t_0) - m_{\text{сл.}}(t), \\ m_{\text{сл.}}(t_0) = A = \text{const}, \\ m(t_0) = 0, \\ \frac{dm_{\text{сл.}}(t)}{dt} = -k(m_{\text{сл.}}(t) - m_{\text{сл.кр.}}). \end{cases} \quad (2)$$

Для второго случая необходимо учитывать давление p . Масса связующего $m_{\text{вых}} = m_{\text{вых}}(t, p)$, выходящего из МК, зависит от двух параметров, в том числе от давления как причины уменьшения межслоевого объема. Эта функция протабулирована исходя из измерений при производстве.

Кроме того, зная полную начальную массу изделия $M_{\text{полн}}$ и массу непропитанных слоев $M_{\text{сл.}}$, вычислим конечную межслоевую массу $m(t_2, p_2)$

$$m(t_2, p_2) = M_{\text{полн}} - (M_{\text{сл.}} + A + m_{\text{вых}}(t_2, p_2)). \quad (3)$$

Используя предположение о том, что выделение связующего зависит только от температуры, получаем систему (2) с небольшими изменениями

$$\begin{cases} t = t(\tau), \tau \in [\tau_1, \tau_2], \\ p = p(\tau), \\ m(t, p) = m_{\text{полн}}(t) - m_{\text{вых}}(t, p), \\ m_{\text{полн}}(t) = m_{\text{сл.}}(t_0) - m_{\text{сл.}}(t), \\ m_{\text{вых}}(t, p) = f(t, p), \\ \frac{dm_{\text{сл.}}(t)}{dt} = -k(m_{\text{сл.}}(t) - m_{\text{сл.кр.}}), \\ m(t_2, p_2) = M_{\text{полн}} - (M_{\text{сл.}} + A + m_{\text{вых}}(t_2, p_2)). \end{cases} \quad (4)$$

Для $\tau \in [\tau_0, \tau_1]$ $f(t, p) = 0$, что приводит к системе (2).

3. Перейдем к решению полученных моделей (2) и (4).

Решение дифференциального уравнения (1) имеет вид $m_{\text{сл.}}(t) = Ce^{-kt} + m_{\text{сл.кр.}}$.

В первой системе, применяя условие $m_{\text{сл.}}(t_0) = A$, получаем $C = (A - m_{\text{сл.кр.}})e^{kt_0}$, т.е.

$$m_{\text{сл.}}(t) = (A - m_{\text{сл.кр.}})e^{-k(t-t_0)} + m_{\text{сл.кр.}}. \quad (5)$$

Далее $m_{\text{полн}}(t) = m_{\text{сл.}}(t_0) - m_{\text{сл.}}(t)$, т.е.

$$m_{\text{полн}}(t) = A - (A - m_{\text{сл.кр.}})e^{-k(t-t_0)} - m_{\text{сл.кр.}}$$

и

$$m(t) = A - m_{\text{сл.кр.}} - (A - m_{\text{сл.кр.}})e^{-k(t-t_0)}. \quad (6)$$

Условие $m(t_0) = 0$ удовлетворяется.

Для второй системы решение будет отличаться только для межслоевой массы

$$m(t, p) = A - m_{сл.кр.} - (A - m_{сл.кр.})e^{-k(t-t_0)} - f(t, p). \quad (7)$$

Из условия (7) для $m(t_2, p_2)$ найдем коэффициент выделения связующего материала

$$\begin{aligned} m(t_2, p_2) &= A - m_{сл.кр.} - (A - m_{сл.кр.})e^{-k(t_2-t_0)} - f(t_2, p_2), \\ (A - m_{сл.кр.})e^{-k(t_2-t_0)} &= (A - m_{сл.кр.}) - f(t_2, p_2) - m(t_2, p_2), \\ e^{-k(t_2-t_0)} &= 1 - \frac{f(t_2, p_2) + m(t_2, p_2)}{A - m_{сл.кр.}}. \end{aligned}$$

Решая последнее уравнение, получим реальное значение коэффициента $k = k_{реал}$

$$k_{реал} = -\frac{\ln\left(1 - \frac{f(t_2, p_2) + m(t_2, p_2)}{A - m_{сл.кр.}}\right)}{t_2 - t_0}, \quad (8)$$

где $m(t_2, p_2)$ берется из условия (3).

С другой стороны, для каждого подобного многослойного изделия существуют нормы, устанавливающие стандарты содержания связующей массы в изделии в зависимости от первоначальной.

Пусть изделие должно содержать x % от первоначальной массы, тогда в наших обозначениях

$$x = \frac{m_{ид}(t_2, p_2) + m_{сл.кр.}}{A} \cdot 100 \%, \quad (9)$$

где $m_{ид}(t_2, p_2)$ – идеальная конечная масса связующего.

Благоприятный случай, если $m(t_2, p_2) \approx m_{ид}(t_2, p_2)$. Допустим, что для нашей задачи выполняется это условие, найдем тогда желаемый коэффициент выделения связующей массы $k_{ид}$, используя равенства (9) и (7)

$$\frac{Ax}{100} = m(t_2, p_2) + m_{сл.кр.}$$

или

$$\frac{Ax}{100} = A - m_{сл.кр.} - (A - m_{сл.кр.})e^{-k(t_2-t_0)} - f(t_2, p_2) + m_{сл.кр.}$$

и

$$(A - m_{сл.кр.})e^{-k(t_2-t_0)} = A - \frac{Ax}{100} - f(t_2, p_2).$$

Откуда получаем значение $k_{ид}$

$$k_{ид} = \frac{\ln(A - m_{сл.кр.}) - \ln\left(A - \frac{Ax}{100} - f(t_2, p_2)\right)}{t_2 - t_0}. \quad (10)$$

4. Относительная погрешность $k_{реал}$ и $k_{ид}$

$$y = \frac{|k_{ид} - k_{реал}|}{k_{ид}} \cdot 100 \%$$

Таким образом, если величина u допустимо мала, то получаем сбалансированный процесс производства, в противном случае необходимо регулировать факторы, определяющие коэффициент выделения связующей массы k (8), т.е. начальное содержание связующего в слоях A , материал слоев, который влияет на содержание минимально возможной массы связующего $m_{сл.кр.}$, режимы температуры и давления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гулд Х., Тобочник Я. Компьютерное моделирование в физике: Учеб. пособие для вузов. Т. 1. – М.: Мир, 1990. – 349 с.
2. Дмитриев О.С., Кириллов В.Н., Мищенко С.В., Дмитриев С.О. Оптимизация режима отверждения изделий из полимерных композитов на основе клеевых препрегов // Клеи. Герметики. Технологии. – 2009. – № 5. – С. 17-24.
3. Тюков Н.И., Даутов А.И., Закурдаева Е.А. Математическая модель процесса формования деталей вертолета из композиционных материалов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2007. – Т. 9, № 7. – С. 97-101.
4. Арсенин В.Я. Методы математической физики и специальные функции: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1984. – 384 с.
5. Акимов И.А., Козлов В.Н. Математические модели тепломассообмена в многослойных конструкциях на этапе изготовления композиционных материалов без учета фазовых переходов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2007. – № 2. – С. 29-30.
6. Лыков А.В. Теория теплопроводности: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.
7. Положий Г.Н. Уравнения математической физики: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1964. – 560 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.А. Соловьев.

Трофимов Павел Александрович – ФГБУ ВПО Оренбургский государственный педагогический университет; e-mail: fizmattrofimov@mail.ru; 460844, г. Оренбург, ул. Советская, 19; тел.: 89225471643; аспирант.

Trofimov Pavel Aleksandrovich – FGBOU VPO the Orenburg State Pedagogical University; e-mail: fizmattrofimov@mail.ru; 19, Sovetskaya street, Orenburg, 460844, Russia; phone: +79225471643; the postgraduate student.