

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

О. И. Карпович

**ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ
ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано
учебно-методическим объединением по образованию
в области машиностроительного оборудования
и технологий в качестве учебно-методического пособия
для студентов учреждений высшего образования
по специальности 1-36 01 08 «Конструирование
и производство изделий из композиционных материалов»*

Минск 2014

УДК 678.027(076.5)

ББК 35.719я73

К26

Рецензенты:

кафедра сопротивления материалов
машиностроительного профиля Белорусского национального
технического университета (доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой *Ю. В. Василевич*);
доктор технических наук, академик НАН Беларуси,
профессор, заведующий лабораторией филиала
«Научно-исследовательский центр проблем ресурсосбережения»
государственного научного учреждения
«Институт тепло-и массообмена имени В. А. Лыкова
НАН Беларуси» *А. И. Свириденко*

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или ее части не может быть осуществлено без разрешения учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Карпович, О. И.

К26 Формообразование изделий из композиционных материалов. Лабораторный практикум : учеб.-метод. пособие для студентов специальности 1-36 01 08 «Конструирование и производство изделий из композиционных материалов» / О. И. Карпович. – Минск : БГТУ, 2014. – 122 с.

ISBN 978-985-530-332-0.

Приведено описание лабораторных работ, которые выполняются по дисциплине «Формообразование изделий из композиционных материалов» и знакомят с основными и перспективными процессами формообразования изделий, методами исследования технологических свойств композиционных материалов.

Предназначено для студентов, может быть использовано специалистами, работающими в области конструирования и производства изделий из композиционных материалов, а также магистрантами и аспирантами соответствующей специальности.

УДК 678.027(076.5)

ББК 35.719я73

ISBN 978-985-530-332-0

© УО «Белорусский государственный технологический университет», 2014

© Карпович О. И., 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Формообразование изделий из композиционных материалов относится к обязательному компоненту специальных дисциплин специальности 1-36 01 08 «Конструирование и производство изделий из композиционных материалов».

Выполняя лабораторные работы, приведенные в данном учебно-методическом пособии, студенты изучают основные физико-химические, теплофизические и механические процессы, протекающие при формообразовании изделий из композиционных материалов; методы определения основных технологических характеристик материалов, необходимых для расчета параметров процессов формообразования; основные стадии процессов формообразования, такие как совмещение и консолидация.

Каждая лабораторная работа содержит подробное теоретическое описание изучаемых явлений или процессов, детальное рассмотрение экспериментальной части с необходимыми сведениями о применяемых материалах, образцах и оборудовании. Многие работы содержат новые методики и перспективные процессы изготовления изделий из композиционных материалов.

В данном пособии содержится большое количество методического материала, который может использоваться студентами не только при выполнении приведенных работ, но и при самостоятельной подготовке курсовых и дипломного проектов.

Автор признателен рецензентам Ю. В. Василевичу и А. И. Свириденку, предложения и замечания которых способствовали улучшению пособия. Особую благодарность автора заслужила Е. З. Василевская, выполнившая техническую часть подготовки авторского оригинала.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ

Лабораторная работа № 1.1

НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ПРИ ФОРМОВАНИИ ИЗДЕЛИЙ

Цель работы – ознакомиться с техникой нагрева и охлаждения композиционных материалов (заготовок, изделий), определением параметров процесса и характеристик материала, необходимых для расчета процесса, сравнением эффективности различных вариантов его осуществления.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Композиционные материалы (КМ) – материалы конструкционного назначения, состоящие из двух и более компонентов, один из которых – *матрица (связующее)* – объединяет частицы *наполнителей*, фиксируя структуру материала, причем частицы наполнителей имеют относительно малые характерные размеры (толщину или диаметр) и придают материалу особые свойства – высокую жесткость и прочность, тепло- или электропроводность, износостойкость и т. п.

Тип матрицы является одним из основных признаков классификации КМ. По данному признаку различают материалы на основе полимерной (термопластичной или терморективной), металлической и неорганической (керамической, цементной и углеродной) матриц. Композиционные материалы с полимерной матрицей составляют более 95% общего объема композитов, применяемых в технике.

Перспективным направлением развития КМ являются нанокompозиты, в которых один из компонентов в одном, двух или трех измерениях имеет размеры, не превышающие 100 нм [1].

Процессы формирования изделий из композиционных материалов протекают в большинстве случаев при повышенных температурах. Это необходимо для перевода матрицы в жидкое или вязкотекучее состояние, а также для отверждения терморезактивных полимерных матриц. Продолжительность нагревания и последующего охлаждения составляет значительную часть основного технологического времени процессов формирования изделий и существенно влияет на их производительность. Повышение температуры материала и последующее охлаждение изделий могут приводить к нежелательным явлениям – термодеструкции компонентов, усадке, короблению и возникновению остаточных напряжений. В связи с этим оптимизация тепловых режимов является важным компонентом разработки технологических процессов формирования изделий из КМ [1].

В зависимости от места расположения по отношению к нагреваемому телу источники тепла разделяют на внешние (расположенные вне тела) и внутренние (находящиеся в самом теле). К внешним источникам относятся формообразующие элементы и нагреватели, контактирующие с заготовкой или изделием (контактный нагрев), жидкости и газы, окружающие заготовку или изделие и перемещающиеся в процессе нагрева (конвективный нагрев), а также лазерные и ИК-излучатели; к внутренним источникам – химические реакции, внутреннее трение, вязкое сопротивление течению.

При *контактном нагреве* температура поверхности контакта может поддерживаться постоянной или изменяться по заданному закону за счет регулируемого подвода тепла от нагревателя. Температура поверхности контакта может изменяться также в результате теплообмена между нагреваемым телом и нагревателем.

При *конвективном нагреве* коэффициент теплопередачи рассчитывается по характеристикам свойств и скорости относительного перемещения среды, относительному положению, размерам и показателям теплофизических свойств нагреваемого тела [2].

Ввиду сложности математического описания процессов теплопереноса при конвекции для оценки коэффициента теплопередачи широко используют методы подобия и размерностей, а зависимость коэффициента теплопередачи от различных параметров выражают через безразмерные комплексы, образованные из этих параметров (критерии подобия):

– критерий Фурье $Fo = a_x t / h^2$, отражающий связь между теплопроводностью материала a_x , продолжительностью нагрева или охлаждения t и характерным размером (например, толщиной) тела h ;

– критерий Био $Bi = \alpha_1 h / k_1$, отражающий связь между условиями подвода тепла к поверхности тела и его отводом вглубь за счет теплопроводности;

– критерий Нуссельта $Nu = \alpha_1 L / k_c$, отражающий связь между условиями подвода тепла к поверхности, размером тела L и коэффициентом теплопроводности среды k_c ;

– критерий Прандтля $Pr = \nu_c / a_c$, отражающий связь между характеристиками переноса в среде, окружающей тело, – коэффициентом теплопроводности a_c и кинематической вязкостью ν_c ;

– критерий Грассгофа $Gr = g L^3 \Delta T / (\nu_c^2 T_c)$, отражающий связь между размером тела L и условиями обтекания его средой ν_c (g – ускорение силы тяжести; $\Delta T = T_c - T_n$ – разность температур среды и поверхности).

При нагреве в печи (термошкафу) и в поле ИК-излучения тепловой поток имеет две составляющие – конвективную и радиационную. Соотношение между ними зависит от конструкции нагревательного устройства. Коэффициенты теплопередачи оценивают по приведенным выше безразмерным критериям.

Эффективный коэффициент теплопередачи определяют как сумму коэффициентов теплопередачи за счет конвекции α_k и излучения $\alpha_{и}$: $\alpha_т = \alpha_k + \alpha_{и}$.

Эффективность процессов нагрева оценивают по коэффициенту полезного действия, представляющему собой отношение количества тепла, переданного изделию при нагреве до заданной температуры, к количеству затраченной на это энергии.

Уравнение теплопроводности однородной и анизотропной сплошной среды при отсутствии внутренних источников тепла имеет вид [2]

$$\nabla \mathbf{k} \nabla T = c_p \rho \frac{dT}{dt}, \quad (1.1)$$

где $\nabla = \mathbf{i}_\alpha (d / dx_\alpha)$ – дифференциальный оператор Гамильтона (\mathbf{i}_α – единичный вектор оси x_α); $\mathbf{k} = (k_{ij})$ – тензор коэффициентов теплопроводности в системе осей x_α , связанных со структурой

среды; T – температура; c_p – удельная теплоемкость; ρ – плотность; t – время.

В случае одномерного теплового потока (например, в направлении оси $x = x_1$) уравнение (1.1) преобразуется к виду

$$a_x \frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{dT}{dt}, \quad (1.2)$$

где $a_x = k_x / (c_p \rho)$, k_x – коэффициенты температуро- и теплопроводности в направлении оси x .

Распределение температуры по сечению изделия находят в результате решения уравнений (1.1) или (1.2). При этом задают исходное распределение температуры по сечению (начальные условия) и условия теплообмена на границе (граничные условия).

При контактном нагреве или охлаждении задают температуру поверхности как постоянную или как функцию времени $T_1 = T_1(0, t)$, при нагреве или охлаждении в жидкой или воздушной среде – поверхностную плотность теплового потока q . Решение задачи зависит от формы тела. Известны решения для тел простой формы – пластины, цилиндра, шара [2].

При контактном нагреве или охлаждении с обеих поверхностей, т. е. при одномерном распространении тепла в направлении оси x изделия, которое может быть представлено в виде пластины толщиной $h = 2h'$ при $h \ll B$ (рис. 1.1), распределение температуры задается рядом

$$T(x, t) = T_1 - (T_1 - T_0) \times \times \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \exp \left[-a_x t \left(\frac{\pi(2n+1)}{h} \right) \right] \cos \left(\pi(2n+1) \frac{x}{h} \right), \quad (1.3)$$

где T_1 – температура контактных поверхностей, причем $T_1 = T(\pm h', t) = \text{const}$ относительно t ; T_0 – начальная температура пластины.

Температура в центре пластины

$$T(t) = T_1 - (T_1 - T_0) \frac{4}{\pi} \sum_n^{\infty} \exp \left[-a_x t \left(\frac{\pi}{h} \right)^2 \right]. \quad (1.4)$$

Ряд в правой части формулы (1.4) быстро сходится, и для оценки температуры в центре через некоторый промежуток

времени после начала нагрева достаточно учесть только первый член ряда, т. е.

$$T(t) = T_1 - (T_1 - T_0) \frac{4}{\pi} \exp \left[-a_x t \left(\frac{\pi}{h} \right)^2 \right]. \quad (1.5)$$

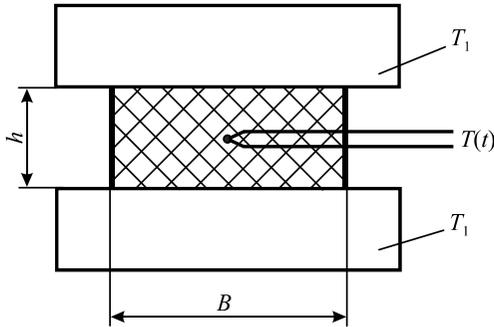


Рис. 1.1. Схема нагрева (охлаждения) пластины между плоскопараллельными пластинами

Из формулы (1.5) можно получить формулу, которую используют в практических расчетах продолжительности нагревания и охлаждения плоских изделий, а также для приближенного определения коэффициента температуропроводности КМ при технологических испытаниях:

$$t = \frac{h^2}{a_x \pi^2} \ln \frac{4}{\pi} \left(\frac{T_1 - T_0}{T_1 - T(t)} \right). \quad (1.6)$$

При расчете температуры в случае нагрева и охлаждения пластины в жидкой или воздушной среде на границе задают поверхностную плотность теплового потока:

$$q_x \equiv \alpha_T [T_1 - T(-h')] = -k_x \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=-h'}$$

и

$$q_x \equiv \alpha_T [T(h') - T_1] = -k_x \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=h'}, \quad (1.7)$$

где α_T – коэффициент теплопередачи.

Решение уравнения (1.2) в данном случае имеет вид

$$T(x, t) = T_1 - (T_1 - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\text{Bi} \cos\left(\frac{b_n x}{h'}\right)}{\left(b_n^2 + \text{Bi} + \text{Bi}^2\right) \cos\left(\frac{b_n}{h'}\right)} \exp\left[-\left(\frac{b_n}{h'}\right)^2 a_x t\right], \quad (1.8)$$

где b_n – корни уравнения $b_n \text{tg}(b_n) = \alpha_x h' / k_x \equiv \text{Bi}$; $h' = h / 2$.

При практических расчетах иногда используют номограммы, построенные в результате решения уравнения теплопроводности (1.2). Время достижения заданной температуры получают из графика зависимости $(T_1 - T(t)) / (T_1 - T_0) = f(\text{Fo})$, где Fo – критерий Фурье.

Показатели свойств материала, входящие в уравнения теплопроводности и в безразмерные критерии, определяющие условия нагрева и охлаждения, зависят от свойств компонентов, их объемных долей и структуры КМ (ориентации осей, связанных со структурой, по отношению к направлению теплового потока). Эти величины могут быть найдены из экспериментов или приближенно вычислены по заданным свойствам компонентов и структуре КМ [1, 3].

Удельную теплоемкость композиций, содержащих только два компонента – наполнитель и матрицу, – рассчитывают путем осреднения теплоемкости компонентов:

$$c_p = c_n C_n + c_m C_m, \quad (1.9)$$

где c_n , c_m , C_n и C_m – удельные теплоемкости и массовые доли наполнителя и матричного вещества соответственно.

Коэффициенты теплопроводности однонаправленного КМ в главных направлениях (ось x_3 – вдоль волокон, ось x_1 – в трансверсальной плоскости) рассчитывают, например, по формулам [3]:

$$k_3 = k_n P_n + k_m P_m; \\ k_1 = [(k_n + k_m) P_n + 2k_n P_n] [(k_n + k_m - 2(k_n - k_n) P_n)]^{-1}, \quad (1.10)$$

где k_n и k_m – коэффициенты теплопроводности компонентов; P_n и P_m – их объемные доли.

Коэффициент температуропроводности в трансверсальном направлении

$$a_1 = \frac{k_1}{\rho c_p}. \quad (1.11)$$

При нагреве или охлаждении на воздухе помимо теплофизических характеристик материала для проведения расчетов необходимы значения коэффициентов теплопередачи. Известны критериальные соотношения, позволяющие оценить эти коэффициенты для заданных условий осуществления процесса. Коэффициент конвективного теплообмена α_k является функцией безразмерных критериев Грассгофа и Прандтля. Коэффициент теплопередачи за счет излучения

$$\alpha_{\text{и}} = \varepsilon c_{\text{и}} (T_1 - T_0)^{-1} \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right], \quad (1.12)$$

где ε – коэффициент излучения (поглощения) изделия; $c_{\text{и}}$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела (постоянная Стефана – Больцмана).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы. Используют образцы, изготовленные из листового КМ, в виде диска или квадратной формы. Толщина образца 8–12 мм. Допускается сваривать или склеивать образцы из двух дисков (пластин) равной толщины. Диаметр образца или сторона квадрата должны быть, по крайней мере, в 5 раз больше его толщины. Толщину образца измеряют с точностью до 0,1 мм не менее чем в трех местах. Разнотолщинность не должна превышать $\pm 0,2$ мм.

В срединной плоскости образца (отклонение не более 0,5 мм) высверливают отверстие диаметром 1–2 мм для установки термопары. Глубину отверстия задают равной радиусу диска или половине стороны квадратной пластины.

Оборудование. В качестве источника нагрева используют пластовискозиметр с плоскопараллельными плитами (рис. 1.2).

Пластовискозиметр имеет обогреваемые плиты 1 и 2, параллельность которых обеспечивается направляющими колонками, перемещающимися в шариковых подшипниках. Температура плит регулируется и контролируется при помощи системы терморегулирования, которая обеспечивает поддержание температуры с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$.

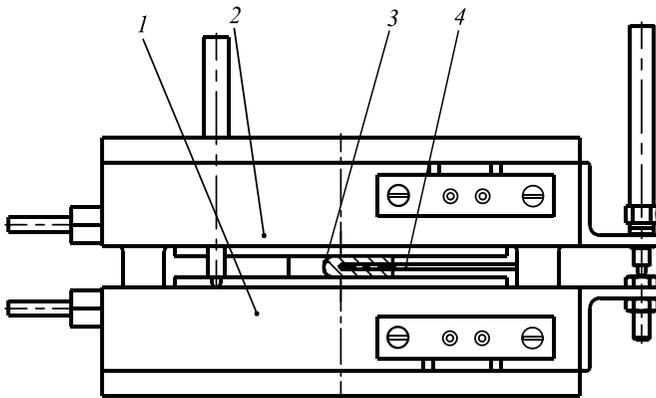


Рис. 1.2. Пластовискозиметр:
1, 2 – обогреваемые плиты; 3 – образец; 4 – термопара

Порядок выполнения

1. Определение коэффициента температуропроводности, оценка эффективности системы контактного нагрева. По формулам (1.9), (1.10) оценивают удельную теплоемкость и коэффициент теплопроводности КМ с учетом характеристик компонентов и их объемной доли. По полученным значениям рассчитывают коэффициент температуропроводности.

Взвешивают образец на весах с точностью 0,1 г. С помощью термопары измеряют температуру образца T_0 (поверхности и в центре). Разность температур не должна превышать 2°C . Устанавливают образец между плоскопараллельными плитами, нагретыми до температуры $T_1 = T_n - (20-40^\circ\text{C})$, поддерживаемой с отклонениями не более $\pm 2^\circ\text{C}$ (T_n – температура плавления матричного полимера). С помощью термопары записывают график изменения температуры в центре образца в течение времени эксперимента. За весь период нагревания образца фиксируют силу тока в системе нагрева и продолжительность включения системы. По времени достижения в центре образца температуры, отличающейся от T_1 не более чем на 10°C , используя формулу (1.6), определяют коэффициент температуропроводности. Сравнивают полученное значение с коэффициентом, найденным по свойствам компонентов (1.11). Используя формулы (1.4) или (1.5), рассчитывают зависимость

температуры в центре образца от времени и сравнивают с полученной в результате эксперимента.

По значениям силы тока и продолжительности включения системы нагрева определяют затраты энергии. Сравнивают с количеством тепла, поглощенным образцом при нагревании:

$$Q_n = c_p m (T_1 - T_0),$$

где m – масса образца.

Вычисляют коэффициент полезного действия системы нагрева.

2. Оценка эффективности нагрева в термошкафу. Образец, изготовленный согласно заданию 1, предварительно взвешивают и помещают в термошкаф с заданной температурой $T_1 = T_n - (20-40^\circ\text{C})$. Предварительно измеряют температуру поверхности и в центре образца T_0 . Разность не должна превышать 2°C . Отклонения температуры в термошкафу от заданной не должны превышать $\pm 5^\circ\text{C}$.

Нагревают образец до температуры, отличающейся от T_1 не более чем на 10°C . В процессе нагрева записывают график изменения температуры в центре образца в течение времени эксперимента.

На протяжении всего периода нагрева фиксируют силу тока в системе и продолжительность ее включения. Используя формулу (1.8), рассчитывают зависимость температуры в центре образца от времени и сравнивают с полученной в результате эксперимента.

Вычисляют количество тепла, необходимое на нагревание образца, количество энергии, фактически затраченное на нагрев, и коэффициент полезного действия системы нагрева. Сравнивают с коэффициентом полезного действия контактного нагрева (см. задание 1).

3. Оценка эффективности ИК-нагрева. Образец, изготовленный согласно заданию 1, предварительно взвешивают и помещают между ИК-излучателями, как показано на рис. 1.3.

Предварительно измеряют температуру поверхности и в центре образца T_0 . ИК-нагреватель должен быть отрегулирован так, чтобы температура поверхности образца не превышала температуру плавления или деструкции компонентов T_n . В процессе нагрева записывают график изменения температуры в центре образца в течение времени эксперимента. Фиксируют силу тока в электрической цепи нагревателя и продолжительность ее включения. Используя формулу (1.8), рассчитывают зависимость температуры в центре образца от времени и сравнивают с полученной в результате эксперимента.

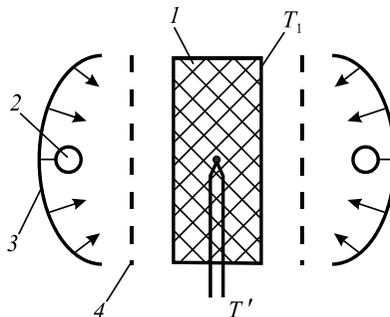


Рис. 1.3. Схема нагрева образца ИК-нагревателем:
 1 – образец; 2 – излучатель; 3 – отражатель; 4 – экран

Вычисляют коэффициент полезного действия системы нагрева, сравнивают с коэффициентом полезного действия контактного нагрева и нагрева в термошкафу.

4. Оценка эффективности охлаждения. Образцы, извлекаемые из нагревательных устройств (при выполнении заданий 1–3), охлаждают по вариантам:

- 1) между массивными плитами;
- 2) при неподвижном воздухе (в вертикальном положении)
- 3) при обдуве воздухом.

В последнем варианте измеряют скорость воздуха вблизи поверхности образца. Записывают изменение температуры в центре образца в течение времени эксперимента. Образец охлаждают до температуры 30–50°C.

Используя формулы (1.5) и (1.8), рассчитывают зависимости температуры в центре образца от времени и сравнивают с полученными в результате эксперимента.

5. Оценка продолжительности нагрева ленты (полосы). Образец композиционного материала в виде ленты шириной 10–50 мм и толщиной 1–3 мм протягивают между ИК-излучателями (рис. 1.4) с заданной скоростью и фиксируют при этом температуры поверхности на входе T_0 , выходе из нагревателя T_1 и на расстоянии 1 м от нагревателя T_2 . Строят зависимость температуры поверхности от скорости протягивания образца и номинальной мощности нагревателя.

Используя зависимость (1.8), вычисляют температуру на поверхности образца в указанных точках и сравнивают результаты расчета с экспериментальными данными.

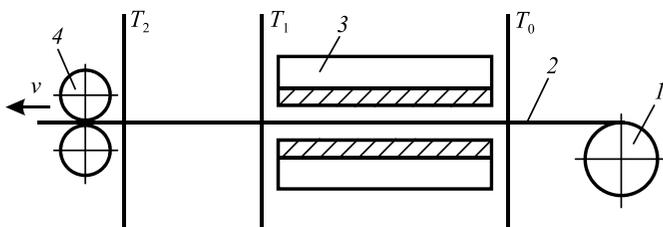


Рис. 1.4. Схема нагрева и охлаждения движущейся ленты (полосы):
1 – накопитель; 2 – лента (полоса); 3 – ИК-нагреватель;
4 – тянущее устройство

Содержание отчета

Отчет должен включать цель работы, содержания заданий, сведения о материалах и образцах, результаты определения теплофизических характеристик материала, условия осуществления процессов нагрева и охлаждения (для каждого задания и варианта материала), результаты сравнения вычисленных и найденных экспериментально параметров исследуемых процессов, их эффективности, графики и таблицы, построенные по результатам работы.

Лабораторная работа № 1.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ТЕКУЧЕСТИ РАСПЛАВА И ПАРАМЕТРОВ СТЕПЕННОГО ЗАКОНА ТЕЧЕНИЯ В КАПИЛЛЯРЕ

Цель работы – ознакомиться с методикой определения параметров закона течения расплавов термопластичных полимеров в капилляре.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Показатель текучести расплава (ПТР) – условная величина, характеризующая поведение термопластичного полимера в вязкотекучем состоянии при переработке его в изделия литьем под давлением, экструзией и другими методами. ПТР определяется количеством материала в граммах, выдавливаемого через стан-

дартный капилляр капиллярного вискозиметра при определенных условиях (температура, давление) и пересчитанного на время течения 10 мин.

Показатель текучести определяют при условиях, регламентируемых ГОСТ 11645–73, в зависимости от вида термопластичного полимера (таблица). Стандартные размеры капилляра: длина $8 \pm 0,025$ мм, внутренний диаметр $2,095 \pm 0,005$ или $1,180 \pm 0,005$ мм.

Условия определения ПТР

Материал	Температура, °С	Нагрузка, Н
Полиэтилен низкой плотности	190	21,19
Полиэтилен высокой плотности	190	49,05
Полипропилен	190; 230; 260	21,19; 49,05; 98,10
Полистирол	200	49,05
Полиамид	230; 275	3,19; 11,77; 21,19
Поликарбонат	250; 280	21,19; 49,05
АБС-пластик	200; 220	49,05; 98,10

ПТР не позволяет судить о вязкостных свойствах термопластичных полимеров. Более полную информацию дают кривые течения, т. е. зависимость напряжения от скорости сдвига в установившемся режиме течения.

Для описания вязкого течения полимерных расплавов и композиций часто используют нелинейные законы. Наибольшее распространение получил закон Оствальда – де-Вилла, согласно которому зависимость между касательным напряжением τ и скоростью сдвига $\dot{\gamma}$ задана в виде степенной функции [3]:

$$\tau = \mu \dot{\gamma}^n, \tag{1.13}$$

где μ – коэффициент консистенции; n – параметр среды ($n < 1$).

Иногда уравнение (1.13) записывают в виде

$$\tau = \mu_e \dot{\gamma}, \tag{1.14}$$

где μ_e – эффективная (кажущаяся, структурная) вязкость, заданная соотношением

$$\mu_e(\dot{\gamma}) = \mu \dot{\gamma}^{n-1}. \tag{1.15}$$

Параметры μ и n зависят от природы и структуры полимера, а также условий течения. Температурную зависимость коэффициента консистенции представляют в форме закона Аррениуса:

$$\mu(T) = \mu_0 \exp\left(\frac{E_b}{R_g T}\right), \quad (1.16)$$

где μ_0 – параметр, имеющий размерность вязкости; E_b – энергия активации вязкого течения; R_g – универсальная газовая постоянная; T – термодинамическая температура.

Параметр n тоже зависит от температуры: с ее увеличением он возрастает, приближаясь к единице.

Касательные напряжения и скорости сдвига зависят от формы поверхностей, ограничивающих пространство, в котором происходит течение, от прилипания или скольжения на границе и распределения давления. Эти величины находят путем решения соответствующей задачи течения – системы уравнений, связывающих известные или поддающиеся измерению параметры, характеризующие условия течения, и параметры закона течения.

В зависимости от формы поверхностей, ограничивающих жидкость, и характера их перемещения различают капиллярные, ротационные и иные методы [1, 3].

Для экспериментального определения параметров закона (1.13) воспроизводят граничные условия, принятые при решении задачи течения, измеряют параметры течения – давление, расход, скорость перемещения жидкости или ограничивающих ее поверхностей. Эксперимент проводят таким образом, чтобы наиболее точно реализовались предположения, принятые при решении задачи течения, лежащей в основе метода.

Модель течения. Пусть нелинейно-вязкая несжимаемая жидкость течет в канале круглого сечения радиусом R . Распределение скорости в этом случае задается формулой [3]

$$v_z(r) = v_0 \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{s+1} \right], \quad (1.17)$$

где z – ось канала; $v_0 = \frac{R^{s+1}}{2^s (s+1) \mu^s} \left| \frac{dp}{dz} \right|^s$ – скорость жидкости на оси канала (рис. 1.5).

Интегрирование скорости по площади сечения канала дает объемный расход жидкости. Пусть L – длина канала; p_0, p_B – давление на входе в канал и выходе из него соответственно. Градиент давления равен $dp/dz = (p_B - p_0)/L$, а объемный расход

$$Q = \frac{\pi R^{s+3}}{2^s (s+3) \mu^s} \left[\frac{p_0 + p_B}{L} \right]. \quad (1.18)$$

Касательные напряжения у стенки канала $\tau(R) = (R/2)(dp/dz)$, а скорость сдвига $\dot{\gamma}(R) = Q(s+3)/(\pi R^3)$.

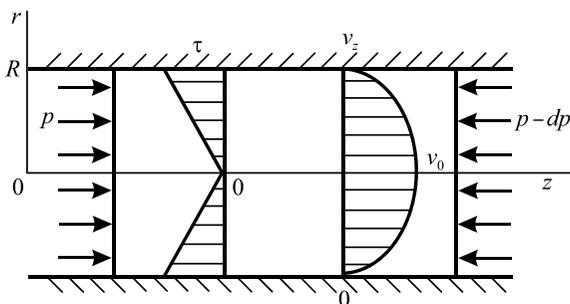


Рис. 1.5. Распределение касательных напряжений и скоростей жидкости при тчении в канале круглого сечения

Приведенные выражения используют для определения параметров степенного закона течения по капиллярному методу. Для этого необходимы, по крайней мере, два опыта при различных значениях параметров капилляра (диаметра, длины) или градиентов давления.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы и оборудование. Эксперименты проводят на приборе ИИРТ-М, схема которого показана на рис. 1.6.

Прибор состоит из обогреваемого корпуса 1, в котором размещается капилляр 2 длиной L и внутренним диаметром d . Необходимая для испытания полимера температура создается за счет нагревателей 5 и поддерживается с заданной точностью с помощью автоматической системы терморегулирования. Контроль

температуры в процессе испытания осуществляется с помощью термопары 6. Давление на расплав полимера 3 создается при помощи поршня 4 и помещаемых на него грузов.

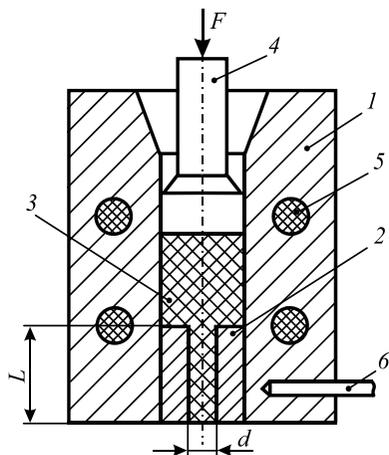


Рис. 1.6. Капиллярный вискозиметр:
 1 – корпус; 2 – капилляр;
 3 – расплав полимера; 4 – поршень;
 5 – нагреватель; 6 – термопара

Порядок выполнения

1. Определение показателя текучести расплава. В камеру прибора вставляют капилляр в соответствии с требованиями стандартов на материал. В таблице (см. с. 15) выбирают необходимую температуру и нагрузку. Нагревают корпус прибора и поршень до требуемой температуры. Отклонения температуры должны быть не более $\pm 0,5^\circ\text{C}$. После достижения необходимой температуры в камеру прибора загружают, тщательно утрамбовывая, навеску термопластичного материала. После заполнения камеры прибора полимером вводят поршень с грузом и фиксируют упором. Выдерживают не менее 5 мин (для прогрева термопласта) и убирают упор из-под поршня. Затем засекают время, одновременно отрезают с помощью ножа экструдат и удаляют его. Последующие отрезки полимера (не менее трех) отделяют через равные промежутки времени в зависимости от его

текучести. Длина отрезков экструдата должна быть в пределах 10–20 мм.

Взвешивают полученные отрезки с точностью до 0,001 г и рассчитывают среднюю массу m . Вычисляют ПТР полимера по формуле

$$\text{ПТР} = \frac{600m}{t}, \quad (1.19)$$

где m – средняя масса отрезков полимера, г; t – промежуток времени между двумя последовательными срезаниями отрезков, с.

Сравнивают полученное значение ПТР со значением, приведенным в нормативной документации на материал.

2. Определение параметров степенного закона течения.

Для эксперимента используют два сменных капилляра одинакового диаметра ($d = 2,095 \pm 0,005$ мм) и различной длины ($L_1 = 8 \pm \pm 0,025$ мм и $L_2 = 20 \pm 0,025$ мм). В камеру прибора вставляют один из капилляров. Нагревают корпус прибора и поршень до требуемой температуры. Отклонения температуры должны быть не более $\pm 0,5^\circ\text{C}$. После достижения необходимой температуры в камеру прибора загружают, тщательно утрамбовывая, навеску термопластичного материала, вводят поршень с грузом и фиксируют упором. Выдержав не менее 5 мин (для прогрева термопласта), убирают упор из-под поршня. Затем засекают время, одновременно отрезают с помощью ножа экструдат и удаляют его. Последующие отрезки полимера (не менее трех) отделяют через равные промежутки времени в зависимости от его текучести. Длина отрезков экструдата должна быть в пределах 10–20 мм. Взвешивают полученные отрезки с точностью до 0,001 г и рассчитывают среднюю массу m . Вычисляют массовый расход полимера по формуле

$$Q = \frac{m}{t}. \quad (1.20)$$

Эксперимент повторяют при 5–6 различных значениях нагрузки.

В прибор устанавливают второй капилляр, имеющий тот же внутренний диаметр, но другую длину, и выдавливают образцы полимера при различных нагрузках. Для длинного капилляра грузы берут несколько больше, чем для короткого, чтобы был примерно один порядок значений напряжений сдвига. По формуле (1.20)

определяют массовый расход полимера при различных значениях нагрузки. Строят зависимость массового расхода от нагрузки на поршень для двух капилляров (рис. 1.7).

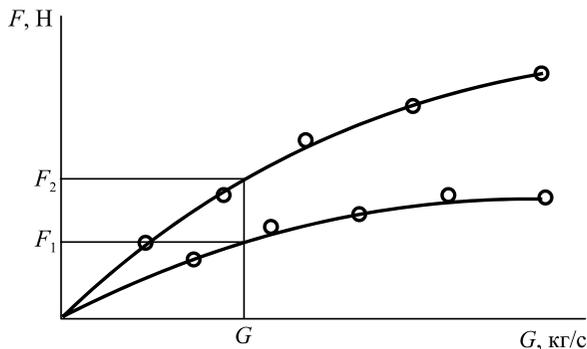


Рис. 1.7. Зависимость массового расхода от нагрузки на поршень

На полученной зависимости выделяют 8–10 сечений при постоянных расходах расплава и определяют значения нагрузки, соответствующие этим сечениям.

По величине нагрузки F_1 и F_2 рассчитывают напряжения сдвига для каждого сечения:

$$\tau = \frac{(F_2 - F_1)r}{2(L_2 - L_1)\pi R^2}, \quad (1.21)$$

где F_1 и F_2 — нагрузка для длинного и короткого капилляров; L_1 и L_2 — длина капилляров; r — радиус капилляров; R — радиус поршня.

Рассчитывают средний градиент скорости сдвига для каждого сечения:

$$\dot{\gamma}_{\text{ср}} = \frac{4G}{\rho\pi r^3}, \quad (1.22)$$

где G — массовый расход расплава; ρ — плотность расплава полимера.

Определяют показатель степени в законе течения:

$$n = \frac{\lg(\tau_2 / \tau_1)}{\lg(\dot{\gamma}_2 / \dot{\gamma}_1)}, \quad (1.23)$$

где τ_1 и τ_2 — значения напряжений сдвига при скоростях сдвига $\dot{\gamma}_1$ и $\dot{\gamma}_2$.

Определяют градиент скорости сдвига:

$$\dot{\gamma} = \frac{(3n+1)\dot{\gamma}_{\text{ср}}}{4n} \quad (1.24)$$

и эффективную вязкость:

$$\mu_e = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}. \quad (1.25)$$

Все необходимые расчеты выполняют в пакете Mathcad.

Содержание отчета

Отчет должен включать цель работы, содержания заданий, сведения о материалах и образцах, результаты определения ПТР и параметров закона течения полимерного расплава, условия эксперимента (температура, нагрузка), графики и таблицы, построенные по результатам работы.

Лабораторная работа № 1.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТЕПЕННОГО ЗАКОНА ТЕЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО РАСПЛАВА МЕТОДОМ СЖАТИЯ ДИСКА

Цель работы – ознакомиться с методикой определения параметров закона течения расплавов термопластичных полимеров по методу сжатия диска.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Одним из известных методов определения параметров закона течения (1.13) является метод сжатия диска между плоскопараллельными плитами. Достоинством данного метода является то, что два параметра, входящих в уравнение (1.13), могут быть определены из одного эксперимента [1, 3].

Модель течения. Пусть диск объемом V из несжимаемой нелинейно-вязкой жидкости деформируется между сближающимися под действием силы F плоскопараллельными плитами (рис. 1.8).

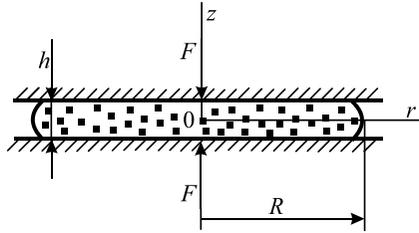


Рис. 1.8. Схема сжатия диска между плоскопараллельными пластинами

Радиус R и толщина диска h связаны условием неизменности объема $V = \pi R^2 h = \text{const}$. Из этого условия следует также связь между скоростью изменения толщины диска, равной скорости сближения плит $v_z = -dh / dt$, и радиальными скоростями v_r в произвольном окружном сечении радиусом r :

$$\pi r^2 v_z = 2\pi r \int_{-h/2}^{h/2} v_r(z) dz. \quad (1.26)$$

Касательные напряжения связаны с радиальным градиентом давления (от координат r и z давление не зависит) соотношением $\tau_{rz} = z(dp/dr)$. Подставив это выражение в закон течения (1.13) и проинтегрировав по z при условии идеального прилипания $v_r(\pm h/2) = 0$, получим распределение радиальной скорости по толщине диска

$$v_r = \frac{h^{s+1}}{(s+1)\mu^s} \left| \frac{dp}{dr} \right|^s \left[1 - \left(\frac{z}{h} \right)^{s+1} \right]. \quad (1.27)$$

Подставив далее это выражение в уравнение неразрывности и проинтегрировав, найдем градиент давления, а затем, проинтегрировав по радиусу, – распределение давления вдоль радиуса:

$$p = p(R) + \frac{(s+2)^n v_z^n R^{n+1} \mu}{2^n (n+1) h^{2n+1}} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{n+1} \right]. \quad (1.28)$$

Интегрирование по площади диска при $p(R) = 0$ дает формулу, связывающую приложенное усилие и параметры течения:

$$F = \frac{\pi (s+2)^n v_z^n R^{n+1} \mu}{2^n (n+3) h^{2n+1}}. \quad (1.29)$$

Выведенные выше соотношения используют при экспериментальном определении параметров полимерных расплавов и композиций. Возможны два варианта испытаний:

1) сжатие плоского слоя между плитами радиусом R , при этом объем вещества, находящегося между плитами, по мере их сближения уменьшается (метод Лауна);

2) сжатие диска заданного объема $V_0 = \pi R^2 h = \text{const}$ между плитами, радиус которых больше R , при этом деформируемый объем остается неизменным.

Пусть во время испытаний по первому варианту (при $R = \text{const}$) усилие F также поддерживается постоянным. Выразим из формулы (1.29) скорость сближения плит v_z как функцию расстояния между ними:

$$v_z = \left[\frac{(n+3)F}{2\pi\mu(s+2)^n R^{n+3}} \right]^{1/n} h^{(2n+1)/n}. \quad (1.30)$$

Значение величин, заключенных в квадратные скобки, остается в течение опыта постоянным, если свойства испытуемого вещества (μ и n) неизменны. Прологарифмировав (1.30), получим:

$$\lg v_z = A_v + \frac{2n+1}{n} \lg h, \quad (1.31)$$

где $A_v = \frac{1}{n} \lg \frac{(n+3)F}{2\pi\mu(s+2)^n R^{n+3}}$.

Из соотношения (1.31) найдем производную функции $\lg v_z$ по переменной $\lg h$:

$$\frac{d \lg v_z}{d \lg h} = \frac{2n+1}{n}, \quad (1.32)$$

Отсюда следует, что в процессе деформирования диска зависимость между толщиной и скоростью ее изменения в двойных логарифмических координатах $\lg v_z - \lg h$ должна быть линейной, а наклон прямой определяется только параметром n . Вычислив на некотором участке кривой $h(t)$ приращения $\lg h$ и $\lg v_z$ и разделив их согласно (1.32), получим уравнение для искомой константы n . Подставив это значение в формулу (1.29), найдем коэффициент консистенции μ .

Если $h(t)$ – толщина диска, сжимаемого силой F , в момент t , v_z – скорость ее изменения, то при испытаниях по второму варианту (при неизменном объеме образца) имеет место соотношение

$$\frac{d \lg v_z}{d \lg h} = \frac{5(n+1)}{2n}. \quad (1.33)$$

Из формулы (1.33) следует выражение для определения показателя степени в законе течения n :

$$n = \frac{5}{\frac{2d(\lg v_z)}{d(\lg h)} - 5}. \quad (1.34)$$

Вместо формулы (1.29) в данном случае ($V_0 = \pi R^2 h = \text{const}$) получаем для усилия сжатия диска следующее выражение:

$$F = \frac{2^{n+1}(s+2)^n \sqrt{V_0^{n+3}} \cdot \mu}{(n+3)(5s+3)^n \sqrt{\pi^{n+1}} \cdot t^n} \left[h^{-(5s+3)/2} - h_0^{-(5s+3)/2} \right], \quad (1.35)$$

где h_0 – начальная толщина диска.

Для коэффициента консистенции μ при тех же условиях имеем

$$\mu = \frac{\pi^{(n+1)/2} (n+3) h^{5(n+1)/2}}{2(s+2)^n v_z^n V_0^{(n+3)/2}}. \quad (1.36)$$

Таким образом, оба параметра (μ и n) закона течения (1.13) могут быть определены из одного опыта по зависимости толщины диска от времени.

Однако в расчетные соотношения входят мгновенные значения скорости изменения толщины диска и их приращения, поэтому даже малые погрешности оценки толщины диска могут привести к большим погрешностям оценки искомых параметров. Чтобы исключить случайные погрешности измерения h , для оценки текущих скоростей и приращений их логарифмов целесообразно строить уравнения линейной регрессии $\lg v_z - \lg h$, а параметр n находить через угловой коэффициент этого уравнения, оцениваемый по методу наименьших квадратов.

Из формулы (1.35) следует зависимость толщины диска от продолжительности действия усилия:

$$h(t) = \left[h_0^{-(5s+3)/2} + \left(\frac{(n+3)^s F^s}{(s+2)2^s \mu^s} \frac{\pi^{(s+1)/2}}{V_0^{(3s+1)/2}} \frac{5s+3}{2} t \right) \right]^{-2/(5s+3)}. \quad (1.37)$$

Дисперсия относительных отклонений экспериментальных значений h_i от значений, вычисленных согласно формуле (1.37), характеризует адекватность модели.

При деформировании диска между плоскопараллельными плитами наибольшие касательные напряжения и скорости сдвига возникают на периферии диска (при $r = R$) и равны соответственно:

$$\tau(R) = \frac{n+3}{2} \frac{hF}{\pi R^3}; \quad \dot{\gamma}(R) = \frac{2n+1}{n} \frac{v_z}{h^2} R. \quad (1.38)$$

Зависимость $\tau(R) - \dot{\gamma}(R)$, построенная с использованием формул (1.38), служит аналогом кривой течения. Вычисляя отношение $\tau / \dot{\gamma}$, находят эффективную вязкость:

$$\mu_e = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{(n+3)n}{2(2n+1)} \frac{F}{\pi R^4} \frac{h^3}{v_z}. \quad (1.39)$$

Если исследуемое вещество в процессе деформирования претерпевает структурные превращения, то для определения параметров закона течения требуются дополнительные уравнения. Их можно, в частности, получить при измерении, помимо толщины диска, давления в центре как функции времени.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы. Диски из термопластичного полимера диаметром 30 или 50 мм и толщиной 3–8 мм получают литьем под давлением, прессованием или вырезают из плит в количестве не менее 5 на каждый режим испытаний.

Диаметр и толщину исследуемого диска 5 измеряют перед установкой в пластовискозиметр штангенциркулем с погрешностью не более 0,1 мм. Непараллельность поверхностей (разнотолщинность диска) не более 0,2 мм.

Для предотвращения скольжения по поверхности плит растекающегося расплавленного диска используют обкладки из бумаги

толщиной 0,1–0,2 мм, вырезанные в виде кругов, диаметр которых равен диаметру плит.

Оборудование. Работу выполняют на пластовискозиметре с плоскопараллельными плитами (рис. 1.9).

Пластовискозиметр имеет плиты 1 и 2, параллельность которых в процессе перемещения обеспечивается направляющими колонками 3, перемещающимися в специальных шариковых подшипниках для уменьшения потерь на трение.

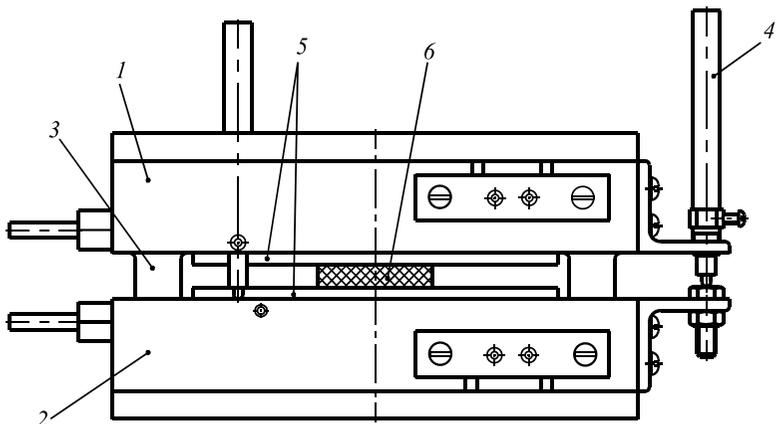


Рис. 1.9. Пластовискозиметр:

1, 2 – обогреваемые плиты; 3 – направляющие колонки;
4 – датчик перемещения; 5 – диски; 6 – исследуемый диск

Система обогрева должна обеспечивать поддержание температуры плит в диапазоне от 100 до 300°C с погрешностью не более $\pm 2^\circ\text{C}$. Температуру устанавливают в зависимости от температуры плавления (размягчения) испытуемого полимера.

Для контроля температуры поверхностей образцов и плит используют бесконтактный ИК-термометр с погрешностью не более $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Усилие задают при помощи калиброванных грузов, устанавливаемых на верхнюю часть пластовискозиметра.

Датчик перемещения 4 подключают к ПЭВМ через аналого-цифровой преобразователь и градуируют по шкале расстояний между плитами. Погрешность преобразователя в диапазоне толщин от 2 до 10 мм должна быть не более 2%.

На обогреваемые плиты крепят диски 5, между которыми деформируется исследуемый образец (диск) 6.

Прибор обеспечивает испытания по двум вариантам, описанным выше. При испытаниях по первому варианту на плиты обогрева вместо плит 5 закрепляют диски заданного диаметра (30 или 50 мм), по второму – диски диаметром 160 мм, заведомо превышающим диаметр растекающегося диска.

Порядок выполнения

На рис. 1.10 показан общий вид пластовискозиметра. В зависимости от типа испытуемого полимера (композиции) устанавливают температуру плит, соответствующую заданной температуре испытаний.

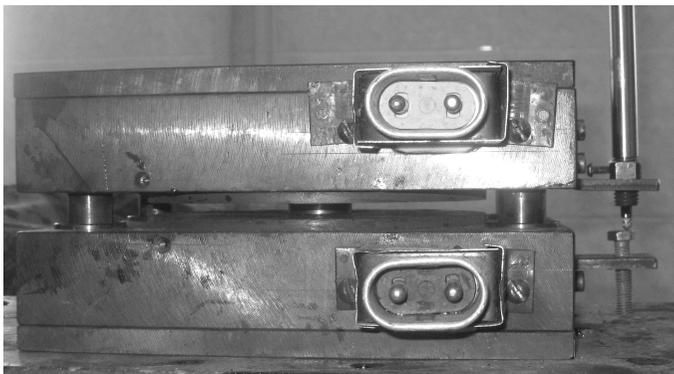


Рис. 1.10. Общий вид пластовискозиметра

Для определения энергии активации в уравнении Аррениуса (1.16) испытания проводят при двух температурах, различающихся не менее чем на 20°C. Например, полипропилен испытывают при температурах 180 и 220°C.

Измеряют толщину и диаметр каждого образца и обкладок с точностью до 0,1 мм. Вычисляют продолжительность нагрева диска между плитами до достижения в центре заданной температуры испытаний согласно формуле

$$t_{\text{н}} = \frac{h_0^2}{\pi^2 a} \left[\frac{4}{\pi} \frac{T_1 - T_0}{T_1 - T(t)} \right] + (5-10)\text{с}, \quad (1.40)$$

где h_0 – толщина диска; a – коэффициент температуропроводности материала диска; T_1 – температура плит (температура испытаний); T_0 – начальная температура образца; $T(t)$ – достигаемая температура в центре – $(T_1 - 5)^\circ\text{C}$.

Предварительно определяют нагрузку, при которой диск растекается между плитами при заданной температуре в течение 10–30 с. Для этого диск с обкладками устанавливают по возможности точно в центре плит. Опускают верхнюю плиту пластовискозиметра до плотного контакта с диском и фиксируют в этом положении упорами. Выдерживают диск между плитами в течение промежутка времени не менее t_n , рассчитанного по формуле (1.40). После этого снимают упор, ограничивающий перемещение верхней плиты, и фиксируют время деформирования диска до прекращения изменения толщины. Подбирают нагрузку, обеспечивающую растекание диска в течение указанного выше промежутка времени.

При испытаниях каждого образца на ПЭВМ формируют файл, задающий шифр испытуемого материала, температуру и номер образца. После снятия упора включают запись сигнала преобразователя перемещений на ПЭВМ. Сигнал преобразователя регистрируют до практического завершения растекания диска (изменения его толщины). Таким образом получают массивы отсчета и соответствующие им показания датчика.

После завершения течения диска выключают запись показаний датчика перемещения, снимают нагрузку, размыкают плиты и извлекают образец. Охладив его, измеряют конечную толщину.

Обработка результатов

В программу обработки результатов испытаний (в пакете Mathcad) вводят исходные данные: шифр материала, температуру испытаний, дату, исходные размеры диска и толщину обкладки, записанный массив значений времени и показаний датчика толщины диска, массу груза, коэффициент преобразования датчика перемещения.

По этим данным в программе рассчитывают объем диска, его начальный диаметр (в момент приложения нагрузки), усилие сжатия.

Из записанного массива показаний датчика перемещения удаляют начальный участок, на котором еще не зарегистрировано из-

менение толщины диска. Оставшийся массив переписывают в новый файл. По значениям конечной толщины диска, коэффициента преобразования датчика и дискретности отсчета по времени рассчитывают текущие значения толщины диска h_i и моменты времени t_i , строят график изменения толщины диска.

Ввиду неизбежных случайных отклонений показаний датчика вычисление скорости изменения толщины как отношения разности значений толщины диска в последовательные дискретные моменты времени к шагу дискретизации ведет к существенным флуктуациям, которые могут иметь разные знаки. Это недопустимо, поскольку в соотношениях (1.32)–(1.34), на основании которых вычисляется показатель степени в законе течения, входят логарифмы скорости. Для устранения данного дефекта метода сглаживают временную зависимость толщины диска путем построения уравнения регрессии по методу наименьших квадратов.

На основании этой операции выбирают уравнение нелинейной регрессии, характеризующееся наименьшей дисперсией отклонений экспериментальных точек. Кроме того, из графика удаляют конечный участок, на котором отмечается заметное отклонение от линейной зависимости между логарифмами толщины диска и скорости ее изменения, вытекающей из уравнений (1.32) и (1.33), при условии неизменности структуры материала на этом участке. С учетом этого по формуле (1.34) вычисляют показатель степени в законе течения. Далее по формуле (1.36) определяют коэффициент консистенции для различных значений толщины, оценивают его среднее значение на расчетном участке и коэффициент вариации.

По формулам (1.38) вычисляют касательные напряжения и скорости сдвига на периферии диска (при $r = R$).

Адекватность параметров закона течения проверяют путем подстановки найденных значений μ и n в уравнение (1.37) и оценки коэффициента вариации отклонений экспериментальных значений толщины диска от рассчитанных по этому уравнению. Найденные значения считают согласующимися с результатами эксперимента, если коэффициент вариации мал, например не более 5%.

По значениям коэффициентов консистенции, определенных при двух значениях температуры, на основании уравнения (1.16) вычисляют параметр μ_0 и энергию активации вязкого течения E_b в

исследованном диапазоне температур. Сравнивают значения показателя степени n в законе течения при двух заданных температурах.

Содержание отчета

Отчет должен включать название и цель работы, краткое описание сущности применяемого метода, схему пластовискозиметра, сведения об испытуемом материале, температурном диапазоне испытаний, описание операций при испытаниях, таблицу с промежуточными результатами (значениями температуры, продолжительности нагрева, усилия, толщины, диаметра образца и др.), расчетные формулы и результаты определения параметров закона течения и уравнения Аррениуса, выводы о влиянии температуры на вязкие свойства исследуемого полимера.

К отчету прилагаются распечатка программы расчета параметров и протокол испытаний.

Лабораторная работа № 1.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАКОНА ТЕЧЕНИЯ ВЫСОКОНАПОЛНЕННОЙ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ

Цель работы – изучить особенности вязкопластического течения композиций, наполненных волокнами и твердыми частицами; оценить влияние степени наполнения, формы и ориентации частиц, условий испытаний на определяемые экспериментально показатели вязкопластических свойств.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Наполнение матричных полимеров твердыми частицами увеличивает сопротивление вязкому течению на стадиях формования изделий, когда полимер находится в виде расплава. При малых концентрациях P_n изотропного наполнителя для оценки увеличения вязкости используют формулу Эйнштейна [3]:

$$\mu = \mu_m (1 + 2,5P_n), \quad (1.41)$$

где μ_m – вязкость матричной жидкости (полимерного расплава); P_n – объемная доля твердых частиц.

Сопротивление течению композиции, содержащей анизометричные частицы, зависит от формы частиц и их ориентации относительно плоскостей сдвига.

Закон вязкого течения полимерных композиций, как и закон течения расплава матричного полимера, часто задают в форме Оствальда – де-Вилла (1.13).

С увеличением степени наполнения композиций коэффициент консистенции μ возрастает, а параметр n , напротив, уменьшается. На значения этих параметров и характер их зависимости от степени наполнения помимо природы матричного полимера влияют форма и размеры частиц наполнителя, его ориентация по отношению к направлениям сдвига при течении.

Методику, изложенную в лабораторной работе № 1.3, используют для экспериментального определения параметров степенного закона течения полимерных композиций. Однако течение высоконаполненных композиций имеет ряд особенностей, которые следует учитывать при постановке эксперимента.

Однонаправленные препреги. Препреги, используемые для изготовления КМ с термопластичной матрицей, характеризуются не только существенной анизотропией структуры и вязких свойств, но и нелинейностью закона вязкого течения.

Различают течение однонаправленного препрега в трансверсальной плоскости и в плоскостях, параллельных волокнам.

Для описания вязкого течения используют модели, учитывающие неоднородность структуры, и различные схемы сдвига при течении однонаправленного препрега: в трансверсальной плоскости, параллельно волокнам при закреплении продольных или поперечных сторон элемента.

Модель первого порядка, характеризующая сдвиг параллельно волокнам, приводит к упрощенной формуле для коэффициента консистенции препрега в виде

$$\mu = \mu_m f_b(P_n), \quad (1.42)$$

где μ_m – вязкость матричного вещества; $f_b(P_n)$ – коэффициент увеличения вязкости препрега по сравнению с вязкостью матричного вещества, зависящий от структуры препрега.

Коэффициент увеличения вязкости препрега приближенно равен

$$f_v(P_n) = (1 - P_n)^{-n}. \quad (1.43)$$

Если волокна в препреге размещены неравномерно, то неоднородным оказывается и сопротивление течению. Неполная пропитка волокнистого наполнителя и небольшое местное увеличение толщины полимерной прослойки приводят к аномальному снижению вязкости при сдвиге вдоль волокон. При этом характер течения однонаправленного препрега при сдвиге параллельно волокнам зависит не только от степени заполнения трансверсального сечения волокнами, но и от способа приложения касательных напряжений.

Показатели вязкости однонаправленного препрега при сдвиге в трансверсальной и продольной плоскостях имеют близкие значения, однако при измерениях вязкость в трансверсальной плоскости оказывается обычно меньше и составляет 0,5–0,8 от продольной. В экспериментах иногда наблюдаются и обратные соотношения, что обусловлено как особенностями структуры образцов, так и условиями их испытаний.

Течение однонаправленного препрега в трансверсальной плоскости реализуется при сжатии полосы длиной L прямоугольного сечения с площадью S_0 между плоскопараллельными плитами (рис. 1.11).

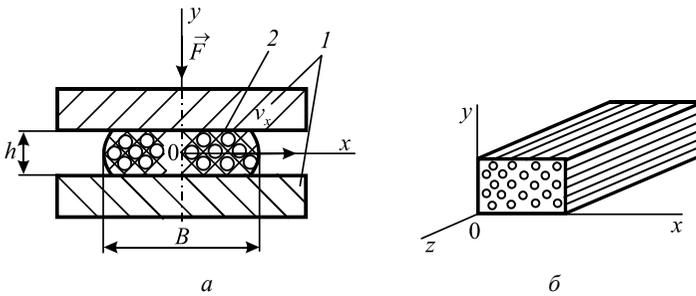


Рис. 1.11. Схема сжатия полосы между плитами (а) и структура образца (б):

1 – плоскопараллельные плиты; 2 – однонаправленный препрег

Данная схема аналогична схеме сжатия диска, рассмотренной выше, однако характер течения при этом отличается: течение однонаправленного препрега происходит только в трансверсальной плоскости $xу$.

В направлении армирования (ось z) течение отсутствует, и длина полосы L не изменяется. Объем и площадь сечения полосы, структура материала (он изотропен в плоскости xy) также не меняются. Предполагается, что имеет место идеальное прилипание материала к поверхности плит. Из этих условий следуют соотношения между параметрами течения препрега, в частности усилием деформирования как функцией показателей вязких свойств, размерами сечения и скоростью сжатия образца:

$$F = \frac{\mu(s+2)^n v_y^n S_0^{n+2} L}{(n+2)h^{3(n+1)}}. \quad (1.44)$$

Как и в случае сжатия изотропного нелинейно-вязкого диска между плоскопараллельными плитами, полученные соотношения могут быть применены для экспериментального определения параметров закона течения препрега в трансверсальной плоскости. Так, из выражения (1.44) следует формула для расчета коэффициента консистенции:

$$\mu = \frac{F(n+2)h^{3(n+1)}}{(s+2)^n v_y^n S_0^{n+2} L}. \quad (1.45)$$

Решая уравнение (1.44) относительно v_y^n и логарифмируя, а затем дифференцируя полученное выражение по $\lg h$, получают формулу для определения показателя степени в законе течения:

$$n = \frac{3}{\frac{d(\lg v_y)}{d(\lg h)} - 3}. \quad (1.46)$$

Изменение толщины полосы, сжимаемой между плитами, соответствующее принятому степенному закону течения, выражается формулой

$$h(t) = h \left(1 + \frac{t}{t'} \right)^{-n/(2n+3)}, \quad (1.47)$$

где

$$t' = \frac{2n+1}{2n+3} \left[\frac{\mu L B^{n+2}}{(n+2)F h^{n+1}} \right]^s. \quad (1.48)$$

Касательные напряжения и скорости сдвига на периферии деформируемой полосы (при $x = \pm B / 2$) равны соответственно:

$$\tau = \frac{F(n+2)h^3}{2^n S_0^2 L} \text{ и } \dot{\gamma} = \frac{(s+2)^s B v_y}{2h^2}. \quad (1.49)$$

Формулы (1.45)–(1.49) необходимы для экспериментального определения параметров степенного закона течения однонаправленного препрега. Используемые при этом технические средства и техника эксперимента мало отличаются от техники, применяемой при определении параметров степенного закона течения полимерных расплавов (см. лабораторную работу № 1.3).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы. Для испытаний наполненных полимерных композиций используют диски диаметром 30 или 50 мм и толщиной 5–10 мм в зависимости от состава композиции и вида испытаний, которые получают литьем под давлением, прессованием или вырезают из плит.

Для определения параметров закона течения однонаправленного препрега используют образцы в виде прямоугольных параллелепипедов длиной 50 мм с размерами сечения (20–30)×(5–10) мм, вырезанные из полосы, полученной пултрузией, прессованием или намоткой.

Число образцов – не менее пяти на каждый режим испытаний.

Размеры образцов измеряют штангенциркулем с погрешностью не более 0,1 мм. Непараллельность поверхностей (разнотолщинность) – не более 0,2 мм.

Оборудование. Пластовискозиметр с плоскопараллельными плитами, используемый для испытаний, описан в лабораторной работе № 1.3.

Для предотвращения скольжения по поверхности плит растекающейся композиции, наполненной твердыми частицами, при определении параметров степенного закона течения используют проволочную сетку толщиной до 1 мм с размерами ячейки, примерно равными длине частиц наполнителя.

Температуру поверхностей плит и образцов контролируют термопарами и бесконтактным ИК-термометром с погрешностью не более $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Порядок выполнения

В зависимости от типа матричного полимера в композиции устанавливают температуру плит, соответствующую заданной температуре испытаний.

Измеряют толщину и размеры в плане каждого образца и обкладок (сетки) с точностью до 0,1 мм.

Вычисляют продолжительность нагрева образца между плитами до достижения в центре заданной температуры испытаний согласно формуле (1.40).

Предварительно определяют нагрузку, при которой образец растекается между плитами при заданной температуре в течение 10–30 с. Устанавливают грузы, обеспечивающие растекание образца на протяжении указанного промежутка времени.

При испытаниях каждого образца на ПЭВМ формируют файл, задающий шифр испытываемого материала, температуру и номер образца. При этом после снятия упора включают запись сигнала преобразователя перемещений на ПЭВМ. Сигнал преобразователя регистрируют до практического завершения растекания образца (изменения его толщины). Таким образом получают массивы отсчета и соответствующих им показаний датчика.

После завершения течения образца выключают запись показаний датчика перемещения, снимают нагрузку, размыкают плиты и извлекают образец. После охлаждения измеряют его конечную толщину.

В программу вводят исходные данные: шифр материала, температуру испытаний, дату, исходные размеры образца и толщину обкладки, записанный массив значений времени и показаний датчика, толщины образца, массу груза, коэффициент преобразования датчика перемещения.

По этим данным в программе (в пакете Mathcad) рассчитывают объем образца, его начальные размеры (в момент приложения нагрузки), усилие сжатия.

Последующие операции обработки результатов измерений аналогичны изложенным в лабораторной работе № 1.3.

По значениям коэффициентов консистенции, найденным при двух значениях температуры, вычисляют параметр μ_0 и энергию активации вязкого течения E_v в исследованном диапазоне температур. Сравнивают также значения показателя степени n в законе течения при заданных температурах.

Содержание отчета

Отчет должен включать название и цель работы, краткое описание сущности применяемого метода, схему пластовискозиметра, сведения об испытуемом материале, температурном диапазоне испытаний, описание операций при испытаниях, таблицу с промежуточными результатами (значениями температуры, продолжительности нагрева, усилия, толщины, диаметра образца и др.), расчетные формулы, результаты определения параметров закона течения и уравнения Аррениуса, выводы о влиянии вида наполнителя, его содержания и температуры на вязкопластические свойства композиции. К отчету прилагаются распечатки программ расчета параметров и протоколы испытаний.

Лабораторная работа № 1.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПРИ СКОЛЬЖЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Цель работы – ознакомиться с методикой определения коэффициента трения скольжения полимерных композиций, установить зависимость коэффициента трения от условий определения.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Трение – сопротивление относительному перемещению тел, находящихся в контакте под действием сил, нормальных к поверхности контакта. Различают трение *сухое* – при непосредственном контакте твердых поверхностей и *жидкостное* – при контакте твердых поверхностей, разделенных прослойкой жидкости. След-

ствием трения являются затраты энергии на взаимное перемещение тел, поверхностные разрушения (изнашивание), возникновение электрических зарядов и др.

Трение обусловлено рядом причин: взаимодействием молекул контактирующих тел (адгезией), механическим взаимодействием в точках контакта, электрическим взаимодействием и др. Жидкостное трение связано с вязкостью жидкости, находящейся в прослойке между телами. Известные теории объясняют природу трения и его следствия на основе гипотез относительно причины поверхностного взаимодействия тел [4].

Технологическое трение [5] играет важную роль в процессах формообразования изделий из КМ как фактор взаимодействия на границах заготовки и формируемого изделия с формирующей оснасткой и как источник дополнительных силовых воздействий на формируемую композицию. Его учитывают при расчетах систем транспортирования и загрузки исходных композиций, режимов пластфикации в экструдерах, технологических параметров прессования, намотки, пултрузии и других процессов.

Обобщенной (интегральной) характеристикой трения служит коэффициент трения, определяемый как отношение силы трения F_T к нормальной силе взаимного прижатия контактирующих поверхностей F_n : $f_T = F_T / F_n$.

Ввиду неоднородности свойств контактирующих поверхностей и условий сопротивления коэффициент трения определяют так же, как отношение касательного напряжения на поверхности контакта τ_s к нормальному напряжению σ_n (или к давлению p): $f_T = \tau_s / \sigma_n$. Различают *силу и коэффициент трения покоя* (при отсутствии перемещения) и *силу и коэффициент трения движения* (при относительном смещении).

Специфика трения в технологических процессах формообразования изделий из КМ обусловлена наличием в материале, взаимодействующем с твердой поверхностью, компонентов с существенно различными свойствами; изменением ориентации и частичным разрушением элементов структуры, расположенных в поверхностном слое; изменением свойств компонентов в процессе скольжения в связи с повышением температуры поверхностного слоя и фазовыми превращениями.

При повышенных температурах, типичных для процессов формообразования изделий из КМ, скольжение в приповерхностном

слое сопровождается вязким течением матричного материала. При этом матричный материал под давлением практически полностью заполняет впадины на формообразующей поверхности оснастки и создает прослойку, в которой происходит вязкое течение, т. е. играет роль граничной смазки. Ввиду малой толщины такой прослойки при относительном смещении в ней возникают высокие скорости сдвига и соответственно значительные касательные напряжения, которые приводят к «срывам» течения – к переходу от прилипания к скольжению. Из-за сложности протекающих при этом явлений закономерности трения в технологических процессах формообразования менее изучены, чем закономерности трения изделий из КМ в условиях эксплуатации.

Влияние трения на усилие формообразования в необходимых случаях при технологических расчетах учитывают, вводя коэффициенты трения, определяемые экспериментально в условиях, близких к условиям формообразования.

Некоторые схемы экспериментальной оценки коэффициента трения композиций по поверхности формообразующей оснастки показаны на рис. 1.12.

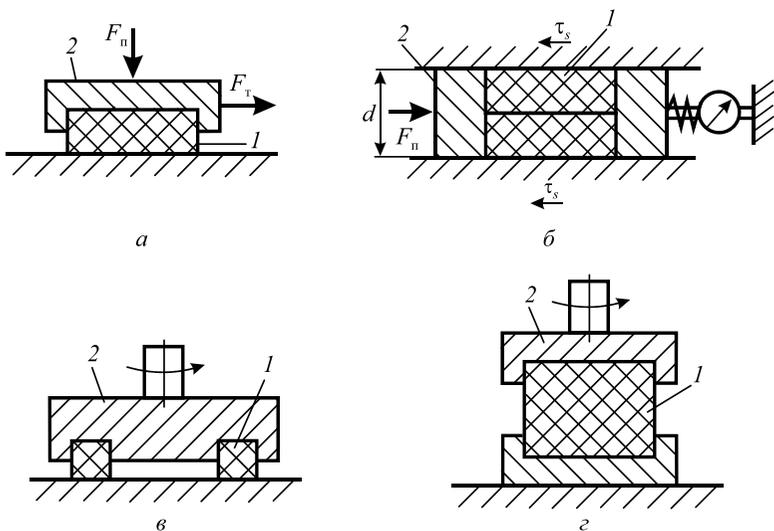


Рис. 1.12. Схемы определения коэффициента трения при поступательном (а, б) и вращательном (в, з) перемещении:

1 – образец; 2 – обойма [5]

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы и оборудование. Для определения коэффициента трения используют образцы полимерного или композиционного материала в виде диска диаметром $30 \pm 0,5$ мм, высотой 5–8 мм. В качестве устройства для создания определенных условий испытания (температуры и давления) используют пластовискозиметр с плоскопараллельными плитами, описанный в лабораторной работе № 1.3.

Порядок выполнения

На рис. 1.13 схематично изображена установка для определения коэффициентов трения композиций на основе термопластичных полимеров и волокнистых наполнителей.

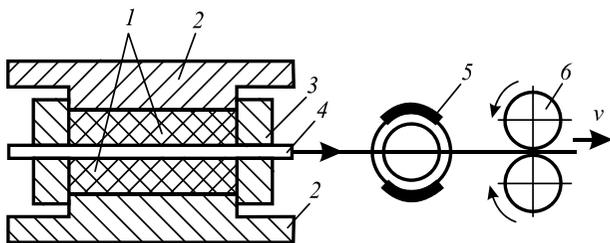


Рис. 1.13. Схема определения коэффициентов трения термопластичных композиций при повышенных температурах:
1 – образцы; 2 – обогреваемые плиты; 3 – обойма; 4 – лента;
5 – силовизмеритель; 6 – привод

Образцы 1 устанавливают в цилиндрическую обойму 3, имеющую прорези, перпендикулярные оси. В прорези вводят стальную полированную ленту 4 таким образом, чтобы каждая ее сторона находилась в контакте с одним из образцов. Затем в обойму с обеих сторон вставляют стальные пуансоны и прижимают образцы к ленте. Пуансоны должны выступать из обоймы не менее чем на 3 мм. Обойму с образцами и лентой помещают между плоскопараллельными плитами 2. Образцы нагревают до температуры испытаний (20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160°C), затем сжимают пуансонами, создавая заданное давление на поверхности, и протягивают ленту с определенной скоростью. Измеряют усилие протягивания с помощью силовизмерителя 5. Общий вид установки показан на рис. 1.14.



Рис. 1.14. Общий вид установки для определения коэффициента трения

Рассчитывают коэффициент трения как отношение среднего значения касательных напряжений на поверхности образцов к среднему давлению. Строят зависимость коэффициента трения от температуры.

Проводят эксперимент при комнатной температуре и не менее чем при трех значениях давления и скорости протягивания. Строят зависимость коэффициента трения от давления и скорости протягивания.

Содержание отчета

Отчет должен включать цель работы, содержание задания, сведения о материалах и образцах, условия испытаний, результаты определения коэффициента трения, графики и таблицы, построенные по результатам работы.

Лабораторная работа № 1.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ КОМПОЗИЦИЙ

Цель работы – изучить методику определения предела текучести вязкопластичных композиций.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Течение высоконаполненных композиций имеет ряд особенностей. Так, вязкое течение высоконаполненных композиций начинается только после достижения определенного значения каса-

тельного напряжения – предела текучести τ_s – и завершается после того, как касательные напряжения во всех частях образца (заготовки) снизились до предела текучести. Поэтому наполненные композиции относят к вязкопластичным средам [1].

Ввиду высокой вязкости композиций в большинстве случаев реализуется режим течения со скольжением на границе. Условия прилипания на границе, типичные для течения низковязких матричных полимеров, справедливы только в отдельных случаях (например, при сжатии полосы или диска между плоскопараллельными плитами) или после применения специальных средств, в частности рифлений либо сетки, ограничивающих смещение частиц наполнителя.

При скольжении на границе коэффициент трения также зависит от состава композиции, температуры композиции и ограничивающей поверхности. Касательные напряжения на границе оказываются меньше предела текучести:

$$\tau_T = f_s \tau_s, \quad (1.50)$$

где f_s – коэффициент трения.

Коэффициент трения, как и показатели вязкопластических свойств полимерной композиции, зависит от температуры поверхности, которая может изменяться в процессе испытаний. Для исключения погрешности, обусловленной влиянием нестационарного температурного режима, испытания проводят следующим образом.

Для определения предела текучести вязкопластичной композиции образец в виде диска помещают между плоскопараллельными плитами и сжимают заданным усилием до завершения вязкопластического течения (до наступления квазиравновесного состояния). Измеряют толщину диска и вычисляют предел текучести τ_T по формуле

$$\tau_T = \frac{Fh}{2V} \left(1 + \frac{1}{3\sqrt{\pi} \cdot h} \sqrt{\frac{V}{h}} \right)^{-1}, \quad (1.51)$$

где F – усилие сжатия диска; h – толщина диска после завершения вязкопластического течения; V – объем диска.

При испытаниях высоконаполненных композиций, содержащих жесткий наполнитель, наблюдается скольжение материала по поверхности плит. В результате возникает методическая погрешность, зависящая от состава композиции и условий испытаний.

Чтобы избежать погрешности, обусловленной скольжением, после наступления квазиравновесного состояния на первой ступени нагрузки и измерения толщины диска нагрузку увеличивают и вновь измеряют толщину диска после достижения квазиравновесного состояния на второй ступени нагрузки. Предел текучести τ_T материала вычисляют по формуле

$$\tau_T = \frac{F_1 h_1^{5/2} - F_2 h_2^{5/2}}{2V(h_1^{3/2} - h_2^{3/2})}, \quad (1.52)$$

где F_1 и F_2 – усилие сжатия диска на первой и второй ступенях нагружения; h_1 и h_2 – толщина диска после завершения вязкопластического течения на первой и второй ступенях нагружения соответственно.

Касательные напряжения на поверхности скольжения и коэффициент трения в формулу (1.52) не входят, но могут быть вычислены по результатам эксперимента.

При определении предела текучести по данному методу предполагается, что материал и его состояние не претерпевают изменений в процессе деформирования на обеих ступенях нагрузки. Если это условие не выполняется, например, при испытаниях структурно-нестабильных материалов или изменяющейся в течение опыта температуре, то данный способ дает методическую погрешность, поскольку различные стадии деформирования образца относятся к различным состояниям материала, характеризующимся в том числе и различными значениями предела текучести.

Для определения предела текучести высоконаполненных полимерных композиций с учетом нестабильности свойств материала и условий деформирования испытывают диски по крайней мере двух различных объемов (радиусов) и (или) при двух различных усилиях измеряют толщину дисков после завершения вязкопластического течения, вычисляют предел текучести τ_T и касательное напряжение τ_s на поверхности плит из уравнений равновесия:

$$F_i = 2\pi\tau_T R_i^2 + 2\pi\tau_s R_i^2 \left(1 + \frac{R_i^3}{3h_i} \right), \quad (1.53)$$

где F_i – усилие сжатия диска i ($i = 1, 2$); R_i , h_i – радиус и толщина диска i после завершения вязкопластического течения.

Это позволяет составить два уравнения равновесия и определить оба параметра материала, входящих в уравнение (1.53), – предел текучести τ_t и касательное напряжение τ_s на поверхности плит.

При определении предела текучести высоконаполненных композиций на основе термопластичных полимеров температуру плит задают меньше температуры расплавленной композиции. В процессе деформирования дисков наблюдается интенсивное охлаждение поверхностей, соприкасающихся с плитами. В результате скольжение на этих поверхностях практически отсутствует. Уравнение равновесия, используемое для вычисления предела текучести и касательного напряжения на поверхности, не учитывает изменения граничных условий, поэтому приводит к погрешностям определения этих показателей.

Чтобы избежать данного недостатка, испытывают диски одинаковой исходной толщины, но, по крайней мере, трех различных радиусов и (или) при трех значениях нагрузки, а предел текучести материала находят в результате совместного решения системы уравнений вида

$$F_i = 2\pi\tau_t R_i^2 \left[1 + \frac{R_{i0}}{3(h_i - h_0)} \right] + 2\pi\tau_s R_i^2 \left[1 + \frac{R_i^3 - R_{i0}^3}{3h_i} \right], \quad (1.54)$$

где F_i – усилие сжатия диска i ($i = 1, 2, 3$); τ_t – предел текучести композиции; R_i и R_{i0} – конечный и исходный радиусы диска i ; h_i – толщина диска i после завершения вязкопластического течения; h_0 – параметр, учитывающий условия деформирования диска; τ_s – касательное напряжение на поверхности диска.

Температура плит в данном случае может быть ниже температуры плавления матричного термопластичного полимера в композиции. Таким образом, исключается прилипание полимерного расплава к плитам, поэтому образцы могут быть беспрепятственно извлечены сразу после достижения квазиравновесного состояния. В результате повышается производительность эксперимента.

Поверхностные слои в средней части диска, контактирующие с плитами, неподвижны. При сжатии диска материал срединных его слоев выдавливается на периферию, где деформируется, скользя относительно поверхности плит. Эту особенность деформирования высоконаполненной полимерной композиции учитывает дополнительный параметр h_0 в уравнении (1.54).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы. Для испытаний наполненных полимерных композиций используют диски диаметром 30 или 50 мм и толщиной 5–10 мм в зависимости от состава композиции и вида испытаний, которые получают литьем под давлением, прессованием или вырезают из плит.

Число образцов – не менее пяти на каждый режим испытаний.

Размеры образцов измеряют штангенциркулем с погрешностью не более 0,1 мм. Непараллельность поверхностей (разнотолщинность) – не более 0,2 мм.

Оборудование. Пластовискозиметр с плоскопараллельными плитами, используемый для испытаний, описан в лабораторной работе № 1.3.

Для нагрева дисков при определении предела текучести и коэффициента трения в нестационарном режиме деформирования используют термошкаф. Температуру поверхностей плит и образцов контролируют термопарами и бесконтактным ИК-термометром с погрешностью не более $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Порядок выполнения

Температуру плит устанавливают равной 30–50°C или иной, при которой матричный полимер композиции не прилипает к плитам.

Диск предварительно нагревают в термошкафу до температуры испытаний. После достижения стабильного значения заданной температуры диск помещают между плоскопараллельными плитами и сжимают заданным усилием до завершения вязкопластического течения. При этом для трех серий образцов задают усилия, различающиеся на 30–50%, например $F_1 = 300$ Н, $F_2 = 500$ Н и $F_3 = 700$ Н.

Значения усилий, толщины дисков h_1 , h_2 и h_3 после завершения вязкопластического течения и соответствующие им радиусы R_1 , R_2 и R_3 подставляют в уравнения вида (1.54) и, решая их, вычисляют предел текучести τ_t .

По другому варианту метода сжимают диски равной толщины (например, 5 мм), но трех различных диаметров (например 30, 40 и 50 мм) одинаковым усилием F и при одинаковой температуре

плит. По значениям усилия, конечных толщин дисков h_1 , h_2 и h_3 , соответствующих им радиусов R_1 , R_2 и R_3 , решая совместно три уравнения вида (1.54), вычисляют предел текучести τ_T .

Содержание отчета

Отчет должен включать название и цель работы, краткое описание сущности применяемого метода, схему пластовискозиметра, сведения об испытуемом материале, температурном диапазоне испытаний, описание операций при испытаниях, таблицу с промежуточными результатами (значениями температуры, продолжительности нагрева, усилия, толщины, диаметра образца и др.), расчетные формулы, результаты определения предела текучести композиции и условия его определения.

СОВМЕЩЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ

Лабораторная работа № 2.1

ПРОПИТКА СТЕКЛОРОВИНГА ТЕРМОРЕАКТИВНЫМИ И ТЕРМОПЛАСТИЧНЫМИ ПОЛИМЕРНЫМИ СВЯЗУЮЩИМИ

Цель работы – ознакомиться с технологией пропитки, изучить зависимости качества пропитки от параметров процесса.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Пропитка – один из способов совмещения компонентов в процессе получения композиционных материалов.

Совмещение – операция, в результате которой компоненты объединяются в однородную массу (композицию).

Различные варианты совмещения компонентов могут быть классифицированы по следующим признакам:

- состояние полимерного связующего;
- тип волокнистого наполнителя;
- продукт, получаемый в результате совмещения;
- способ и условия осуществления и др.

В процессе совмещения с волокнистым наполнителем полимерное связующее может находиться в жидком или твердом состояниях.

В жидком состоянии обычно совмещают с наполнителями мономеры или растворы термореактивных и реже термопластичных полимеров, а также расплавы термопластичных полимеров. Совмещение в жидкой фазе происходит путем заполнения связующим порового пространства волокнистой системы (пропитка) или механического перемешивания, например в процессе пласти-

кации термопластичного полимера при получении литевых композиций, армированных волокнами.

В твердой фазе волокнистые наполнители совмещают с термопластичными и (значительно реже) с термореактивными полимерами. При этом связующее может применяться в виде порошка, коротких или непрерывных волокон, пленок. По виду связующего различают порошковую, волоконную и пленочную технологию получения КМ с термопластичной матрицей. Совмещение происходит в результате перемешивания коротких волокон – частиц – в смесителях или непрерывных волокон путем составления комбинированных нитей, получения комбинированных тканей, плетения, осаждения порошков на поверхности волокон, составления комбинированных слоев волокнистый наполнитель – полимерная пленка.

К смешанным вариантам относится процесс совмещения, в котором используют суспензии связующего.

Волокнистый наполнитель в процессе совмещения со связующим используют в виде волокон – коротких (рубленых) или непрерывных (нитей, ровинга), а также холста и ткани. От вида наполнителя зависят условия совмещения.

В результате совмещения компонентов может быть получен полуфабрикат (смесь компонентов, пресс-композиция, препрег, премикс, лента, гранулы, лист и т. п.). При этом на стадии получения фабриката степень совмещения может быть неполной (механическая смесь компонентов или частичная пропитка наполнителя связующим), тогда окончательная пропитка происходит на стадии формообразования изделия, или полной – в этом случае структура материала практически не изменяется в процессе формообразования изделия.

Возможно также совмещение компонентов непосредственно перед формообразованием (при так называемой одностадийной технологии получения изделия из КМ), например пропитка ровинга при напылении стеклопластиков, мокрой намотке, пултрузии и др., или в процессе формообразования, например при заливке или впрыске жидкого связующего в форму, заполненную волокнистым наполнителем, по методам, обозначаемым в зарубежной литературе как Resin Transfer Molding (RTM, заливка смолой) или Structural Reaction Injection Molding (S-RIM, впрыск реагирующей смеси).

Качество совмещения компонентов характеризуют: соотношения объемных долей и распределение их по объему (однородность

композиции, материала, пористость); микроструктурные показатели однородности (параметры распределения числа волокон и размеров промежутков между ними); структурно зависимые показатели механических свойств получаемого материала (прочность при изгибе, сдвиге параллельно волокнам, ударная вязкость и т. п.), особенности неоднородности этих свойств. Для каждого материала (полуфабриката) выбирают наиболее подходящие показатели качества.

Известны многочисленные варианты осуществления операции совмещения компонентов КМ. Пропитка – наиболее распространенный способ совмещения волокнистых наполнителей с полимерными связующими. Он доминирует при получении КМ с терморезактивной полимерной матрицей и все более широко используется в последние годы для получения КМ с термопластичной матрицей (по так называемой расплавной технологии). В основе процесса – насыщение волокнистого наполнителя (заполнение порового пространства между волокнами) жидким связующим [1].

Процесс может осуществляться:

- без внешнего давления (только за счет сил поверхностного натяжения жидкости) – путем пропитки при наливе, напылении;
- при малом (гидростатическом) давлении – путем окунания;
- при повышенном давлении, создаваемом при протягивании наполнителя в контакте с отклоняющимися элементами или за счет сил вязкого сопротивления при протягивании через калиброванные фильеры;
- при высоком давлении, создаваемом в пропитывающем устройстве специальными средствами нагнетания связующего.

Коэффициенты проницаемости однонаправленного волокнистого слоя. Расход нелинейно-вязкой жидкости со степенным законом течения через единичную площадку пористой среды при градиенте давления dp / dx равен [6]

$$q_1 = \frac{K_x}{\mu^s} \left(\frac{dp}{dx} \right)^s, \quad (2.1)$$

где K_x – коэффициент проницаемости в направлении оси x ; μ – коэффициент вязкости жидкости; $s = 1 / n$; n – показатель степени в законе течения. При $s = n = 1$, т. е. для ньютоновской жидкости, выражение (2.1) преобразуется в известный закон Дарси:

$$q_1 = \frac{K_x}{\mu} \left(\frac{dp}{dx} \right). \quad (2.2)$$

Коэффициент проницаемости зависит от структуры порового пространства. Размерность величины K_x зависит от показателя степени в законе течения, т. е. в общепринятом смысле коэффициент проницаемости для нелинейно-вязкой жидкости не является физической величиной.

В результате статистического обобщения так называемой щелевой модели Козени – Кармана для коэффициента проницаемости однонаправленного волокнистого слоя в трансверсальном направлении получено следующее выражение [1]:

$$K_x = \left(\frac{\pi R}{1 - \Pi} \right)^{s+1} \frac{\Gamma(1 + (s + 2) / q) \Pi^{s+2}}{(s + 2) 2^{2(s+1)} \Gamma(1 + 1 / q)^{s+2}}, \quad (2.3)$$

где R – радиус волокна; Π – исходная пористость волокнистой системы; $\Gamma(\dots)$ – гамма-функция; q – показатель степени в законе распределения Вейбулла для промежутков между волокнами.

Коэффициент проницаемости волокнистой системы вдоль направления волокон [1]

$$K_z = \frac{R^{s+1} \Pi^{s+2}}{(s + 3) 2^s (1 - \Pi)^{s+1}}. \quad (2.4)$$

Анализ коэффициентов проницаемости, рассчитанных по формулам (2.3) и (2.4), показывает, что в случае неньютоновских жидкостей ($s > 1$) коэффициенты проницаемости и степень анизотропии (отношение K_x / K_z) существенно зависят от параметра n . При этом коэффициент проницаемости вдоль волокон на два порядка меньше, чем перпендикулярно волокнам.

Проницаемость слоя со стохастическим расположением волокон зависит от распределения зазоров между волокнами. Наличие широких зазоров, встречающихся с вероятностью менее 1%, может увеличить проницаемость на десятки процентов. Эффект влияния неоднородности структуры волокнистого слоя усиливается в случае течения через него нелинейно-вязкой жидкости.

При $q = 1$, что типично для однородной (в стохастическом смысле) волокнистой структуры, формула (2.3) имеет вид

$$K_x = \left(\frac{\pi R}{1 - \Pi} \right)^{s+1} \frac{\Gamma(s+2) \Pi^{s+2}}{2^{2(s+2)}}. \quad (2.5)$$

В частном случае – для ньютоновской жидкости – коэффициент проницаемости

$$K_x = \frac{\pi^2 R^2}{8} \frac{\Pi}{(1 - \Pi)^2}. \quad (2.6)$$

Зависимость коэффициента проницаемости волокнистого слоя от радиуса, объемной доли волокон и пористости, заданная выражением (2.6), типична для моделей типа Козени – Кармана [6]. С учетом этой зависимости коэффициент проницаемости волокнистого слоя в трансверсальном направлении, определяемый экспериментально, представляют в виде [6]

$$K_x = \frac{R^2}{4c_x} \frac{\Pi^3}{(1 - \Pi)^2}, \quad (2.7)$$

где c_x – так называемая константа Козени – параметр, определяемый по экспериментальным значениям коэффициента K_x .

Коэффициенты проницаемости волокнистого слоя не являются константами: они не только зависят от параметров процесса пропитки, но и изменяются в ходе этого процесса ввиду изменения геометрии порового пространства за счет перемещения волокон. Поэтому различие рассчитанных и найденных экспериментально коэффициентов проницаемости оказывается значительным.

Глубина и степень пропитки слоя, кинетическое уравнение.

Пусть расплавом, течение которого подчиняется степенному закону (1.13), пропитывается волокнистый слой, при этом пористость слоя Π и коэффициент проницаемости K_x остаются неизменными. Давление на поверхности слоя $p(t)$ в процессе пропитки изменяется. Градиент давления $p(t) / x$ также изменяется ввиду изменения не только давления, но и глубины пропитанного слоя x . Тогда из уравнения (2.1) для расхода расплава через единицу площади слоя следует дифференциальное уравнение, определяющее глубину пропитки:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{K_x}{\Pi \mu^s} \left(\frac{p_0}{x} \right)^s. \quad (2.8)$$

Введем величину $K_e = K_x / \Pi$, которую назовем эффективным коэффициентом проницаемости. Тогда интегрирование уравнения (2.8) после разделения переменных дает зависимость средней глубины проникновения расплава h от t – продолжительности действия давления p :

$$h(t) = \left[(s+1) K_e \left(\frac{p_0}{\mu} \right)^s t \right]^{1/(s+1)}. \quad (2.9)$$

Толщина ленты препрега с объемной долей полимера, равной Π , формируемого из ровинга с линейной плотностью T , равна

$$h_0 = \frac{10^{-3} T}{\rho(1-\Pi)b}, \quad (2.10)$$

где ρ – плотность материала волокон, кг/м³.

Отношение суммарной глубины пропитки к толщине формируемого препрега h_0 может рассматриваться как степень пропитки ровинга полимерным расплавом при заданных технологических режимах:

$$C(t) = \frac{h(t)}{h_0}. \quad (2.11)$$

Введенная согласно соотношению (2.11) величина C пропорциональна относительному числу (и доле поверхности) волокон, смоченных полимером.

Пропитка в устройствах со штырями и роликами. Давление волокнистого слоя на поверхность штыря, создаваемое за счет натяжения ровинга, равно

$$p = \frac{F}{Rb}, \quad (2.12)$$

где F – натяжение слоя; R – радиус поверхности; b – ширина волокнистого слоя.

Ширина слоя, в который под натяжением раскладывается ровинг, зависит от его линейной плотности, диаметра и коэффициента трения волокон, радиуса кривизны поверхности и натяжения слоя. Для стеклоровинга с линейной плотностью в диапазоне от 1200 до 5000 текс (диаметр волокон 13–18 мкм) экспериментально установлена следующая регрессионная зависимость ширины слоя от указанных параметров [1]:

$$b = k_b \sqrt{A_0} \left(1 + k_F \sqrt{\frac{F}{R}} \right), \quad (2.13)$$

где b – ширина слоя, мм; A_0 – общая площадь волокон в ровинге, мм²; F – натяжение, Н; R – радиус кривизны цилиндрической поверхности, м; $k_b = 5,6$; $k_F = 2,4 \cdot 10^{-3}$ м/Н^{0,5}.

Если пропитка происходит на участке цилиндрической поверхности ролика радиусом R (рис. 2.1) в процессе протягивания волокнистого слоя со скоростью u_0 , то вместо переменной t в уравнение (2.9) можно ввести центральный угол $\alpha = u_0 t / R$. В результате интегрирования уравнения (2.8) получим следующее уравнение, описывающее кинетику процесса пропитки волокнистого слоя:

$$h(\alpha_0) = \left[\frac{(s+1)K_e R^{\alpha_0}}{\mu^s u_0} \int_0^{\alpha_0} p^s(\alpha) d\alpha \right]^{1/(1+s)}. \quad (2.14)$$

Здесь α_0 – угол обхвата ролика волокнистым слоем – центральный угол участка цилиндрической поверхности, контактирующего с пропитываемым слоем.

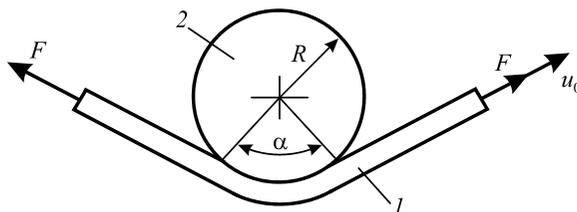


Рис. 2.1. Схема пропитки волокнистого слоя 1 на поверхности ролика 2

Из уравнения (2.14) видно, что глубина пропитанного слоя зависит как от характеристик вязких свойств расплава, так и от режимов пропитки – скорости перемещения волокнистого слоя u и распределения давления на участке пропитки $p(\alpha)$. Если ролик вращается и линейная скорость точек его поверхности равна скорости перемещения волокнистого слоя, то давление в полимерной прослойке остается постоянным. При различии этих скоростей распределение давления зависит от режима сдвигового течения про-

слойки. Определение параметров течения полимера в прослойке, как и в случае плоскощелевой головки, сводится к решению задачи о движении нелинейно-вязкого слоя толщиной δ в зазоре между неподвижной и движущейся со скоростью u поверхностями [1].

Оптимальные режимы процесса соответствуют пропитке волокнистого слоя на всю его толщину h_0 . Если пропитка должна завершиться после контакта волокнистого слоя с одним роликом, то глубина проникновения расплава к моменту t_0 должна быть равна толщине слоя: $h(t_0) = h_0$. При пропитке с использованием двух и более цилиндрических элементов суммарная глубина пропитанного слоя должна быть равна h_0 . В частности, при двухсторонней (и симметричной) пропитке $h(t_0) = h_0 / 2$. Достигнутая к моменту t степень пропитки $C(t) = h(t) / h_0$. Полная пропитка соответствует достижению $C(t_0) = 1$.

Из кинетического уравнения (2.14) следует, что для полной односторонней пропитки параметры процесса должны удовлетворять соотношению

$$\frac{h_0^{s+1} \mu^s u_0}{(s+1) K_e R} = \int_0^{\alpha_0} p^s(\alpha) d\alpha. \quad (2.15)$$

При протягивании ровинга через пропиточное устройство с несколькими штырями последовательно пропитываются обе стороны волокнистого слоя. Если одна из сторон ровинга контактирует с r_1 штырями с радиусами R_i , профилем давления p_i и углом обхвата α_i ($i = 1, \dots, r_1$), а другая – с r_2 штырями ($j = 1, \dots, r_2$), то глубина пропитки с первой стороны увеличивается согласно уравнению

$$h_i^{s+1} = h_{i-1}^{s+1} + \frac{(s+1) K_e^{(i)} R_i}{\mu^s u} \int_0^{\alpha_i} p_i^s(\alpha) d\alpha. \quad (2.16)$$

Уравнение для глубины пропитки второй стороны волокнистого слоя получается заменой в уравнении (2.16) индекса i на j . Суммарная глубина пропитки равна

$$h = \sum_{i=1}^{r_1} h_i + \sum_{j=1}^{r_2} h_j. \quad (2.17)$$

Из выражений (2.14) и (2.16) следует, что для полной пропитки волокнистого слоя требуется обеспечить соответствующий профиль

давления в полимерной прослойке между слоем и поверхностью ролика. Максимальное натяжение волокнистого слоя, а следовательно, и максимальное давление в прослойке ограничены условием прочности волокон и условиями выдавливания расплава из прослойки. Согласно первому условию, натяжение не должно превышать значения, при котором начинается разрушение волокон, при этом можно принять $F < 0,2F_p$, где F_p – разрушающая нагрузка.

Полимерная прослойка в зазоре между пропитываемым волокнистым слоем и цилиндрической поверхностью ролика образуется в результате транспортирования расплава роликом и (или) волокнистым слоем, как это показано на рис. 2.2, а, или в результате выдавливания расплава через систему отверстий в ролике (рис. 2.2, б).

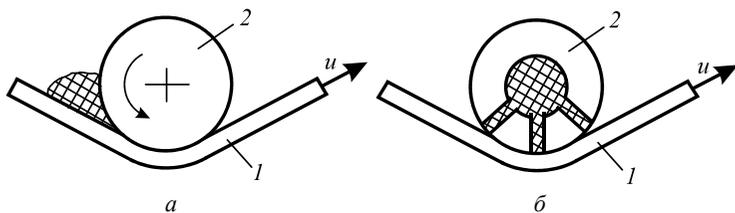


Рис. 2.2. Схемы подачи полимерного расплава:

а – транспортирование волокнистым слоем 1 и роликом 2;

б – выдавливание через отверстия в ролике

В устройствах с неподвижными штырями (или их сегментами) расплав подается либо движущимся слоем из ванны, в которой размещены штыри, либо через отверстия или щели в самом штыре (сегменте). В последнем случае возможны различные варианты расположения отверстий: в середине контактной поверхности или со смещением относительно центра.

Под действием давления, создаваемого натянутым волокнистым слоем, полимерная прослойка может выдавливаться из зазора между слоем и поверхностью ролика. Если ширина волокнистого слоя b остается при этом постоянной, то распределение давления по ширине полимерного слоя находится в результате решения задачи о сдавливании нелинейно-вязкой полосы. Решив эту задачу, получим формулу, задающую в неявном виде толщину полимерной прослойки как функцию параметров процесса пропитки. Натяжение волокнистого слоя, при котором между ним и цилинд-

рической поверхностью существует прослойка полимера требуемой толщины δ_0 , равно

$$F(u) = \mu(s+2)^n b^{n+2} (2\delta_0 R - \delta_0^2)^{n/2} R^{1-n} \alpha_0 [2(n+2)\delta_0^{2n+1}]^{-1} u_0^n. \quad (2.18)$$

Увеличение скорости перемещения волокнистого слоя и уменьшение усилия натяжения приводят к увеличению начальной толщины прослойки.

Для определения оптимальных режимов процесса пропитки строят так называемые силоскоростные диаграммы – зависимости между натяжением и скоростью протягивания ровинга, при которых, с одной стороны, обеспечивается образование прослойки минимально необходимой толщины, а с другой – полная пропитка. Силоскоростную диаграмму процесса образования пленки строят согласно уравнению (2.18).

Пренебрегая влиянием вязкого сопротивления полимерной прослойки на профиль давления, зависимость между натяжением и скоростью протягивания ровинга, при которых достигается пропитка на глубину h , записывают в виде

$$F(u) = \mu R b h^{n+1} \left[(s+1) K_e \alpha \frac{R}{u} \right]^{-n}. \quad (2.19)$$

Для построения силоскоростной диаграммы процесса пропитки используют уравнения (2.18) и (2.19). Область, лежащая между двумя диаграммами, является областью допустимых сочетаний силоскоростных параметров процесса, при которых происходит полная пропитка ровинга в заданных условиях (рис. 2.3).

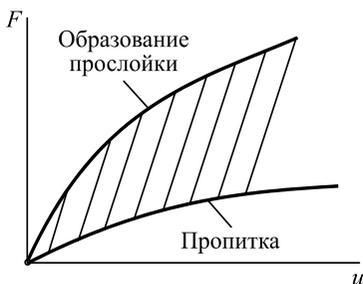


Рис. 2.3. Силоскоростные диаграммы пропитки волокнистого слоя и образования полимерной прослойки

Оценка качества пропитки. Качество пропитки оценивают по степени пропитки – доле смоченных полимером волокон, по глубине проникновения полимера, а также механическим характеристикам получаемых материалов, наиболее чувствительным к пористости и однородности структуры КМ.

Глубину и степень пропитки определяют по результатам исследования микрошлифов структуры препрега или КМ. Для большей контрастности изображения пустоты между волокнами заполняют красящими веществами, выдерживая образец погруженным в жидкий краситель. Глубину пропитки оценивают прямыми измерениями толщины волокнистого слоя, заполненного полимером, или путем подсчета волокон, находящихся в смоченном слое. Степень пропитки вычисляют как отношение числа смоченных полимером волокон на представительном участке микрошлифа к общему числу волокон на этом участке.

Наиболее чувствительны к степени пропитки и однородности структуры однонаправленных композитов характеристики упругих свойств и прочности при растяжении перпендикулярно волокнам и сдвиге вдоль волокон. Чаще определяют показатели прочности при сдвиге параллельно волокнам. Недостаточная пропитка, неоднородность распределения связующего по сечению ленты снижают ее прочность. Поэтому по относительной прочности ленты судят о степени и однородности пропитки. Для этого ленту однонаправленного препрега надрезают с двух сторон и нагружают растягивающим усилием до разрушения (рис. 2.4). Разрушение происходит путем сдвига параллельно волокнам. Разрушающее напряжение при сдвиге

$$\tau = \frac{F^*}{2Lh}, \quad (2.20)$$

где F^* – разрушающая нагрузка; L – длина рабочей части (расстояние между надрезами); h – толщина образца в месте разрушения.

Разрушение путем сдвига между волокнами может происходить и при трехточечном изгибе относительно коротких образцов прямоугольного сечения. При этом толщина образца h должна удовлетворять соотношению: $h/2L > \tau/\sigma^{3+}$, где L – расстояние между опорами; τ – прочность при сдвиге; σ^{3+} – прочность при растяжении в направлении армирования, которую оценивают приближенно по прочности и доле компонентов (по сеточной теории)

или определяют экспериментально, например, по методу растяжения колец, полученных намоткой.

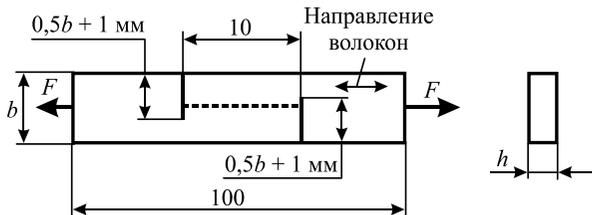


Рис. 2.4. Образец для определения прочности ленты при сдвиге вдоль волокон

Образцы для испытаний на изгиб в этом случае также вырезают из колец (рис. 2.5).

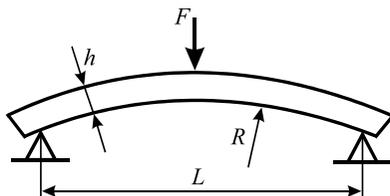


Рис. 2.5. Схема испытания сегмента кольца на изгиб

Рекомендуемое соотношение между средним радиусом кольца R и расстоянием между опорами при испытаниях на изгиб: $L/2R < \sigma^{1+}/\tau$, где σ^{1+} – допустимое напряжение при растяжении в радиальном направлении. Прочность при растяжении в радиальном направлении составляет при степени армирования 0,5 около половины от прочности при растяжении связующего. Указанное соотношение не является критическим, поскольку действие радиально-растягивающего напряжения при испытаниях на изгиб криволинейного образца при нагружении выпуклостью вверх усиливает эффект влияния дефектов пропитки материала на разрушающую нагрузку. Прочность при сдвиге рассчитывают по формуле

$$\tau = \frac{3F^*}{4bh}, \quad (2.21)$$

где F^* – разрушающая нагрузка; b и h – размеры сечения образца.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы. Для пропитки термореактивным связующим используют стеклоровинги с линейной плотностью 2400 текс и диаметром элементарного волокна 13 или 20 мкм. В качестве связующего используют составы на основе эпоксидной (ЭД-20) или полиэфирной (ПН-1) смол. Состав связующего на основе эпоксидной смолы: ЭД-20 – 100 мас. ч., ПЭПА (отвердитель) – 10–15 мас. ч. Для пропитки термопластичными связующими используют стеклоровинги с линейной плотностью 2400 текс и диаметром элементарного волокна 13 или 20 мкм. В качестве связующего используют полипропилен, полиамид или полиэтилентерефталат с ПТР не менее 20 г/10 мин.

Оборудование. Изучение процесса пропитки термореактивным связующим осуществляют на универсальном намоточном устройстве, показанном на рис. 2.6.

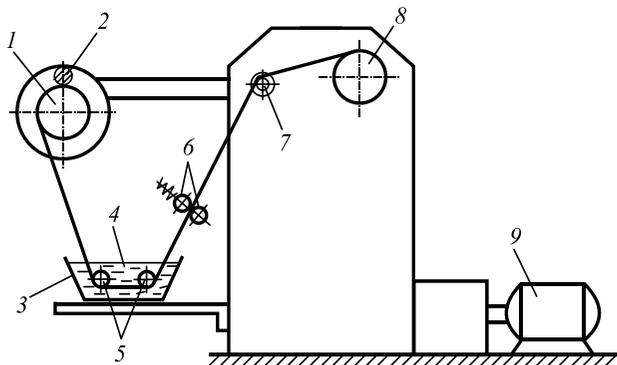


Рис. 2.6. Устройство для пропитки стеклоровинга термореактивным связующим:
 1 – паковка стеклоровинга; 2 – тормозное устройство;
 3 – направляющее устройство; 4 – связующее;
 5 – пропиточные ролики; 6 – отжимные ролики;
 7 – направляющий ролик; 8 – оправка; 9 – электропривод

Устройство включает шпулярник с установленной паковкой стеклоровинга 1. Усилие натяжения стеклоровинга регулируется с помощью фрикционного тормозного устройства 2. С паковки ролинг поступает в пропиточную ванну 3, которая представляет со-

бой емкость, заполненную связующим 4. Пропитка осуществляется на роликах 5. Излишки связующего отжимаются с помощью отжимных роликов 6. После прохождения ванны 3 пропитанный связующим ровинг через направляющий ролик 7 наматывается на оправку 8. Вращение оправки осуществляется при помощи электропривода 9.

Изучение процесса пропитки термопластичным связующим осуществляют на универсальной пултрузионной установке на базе червячного экструдера ЧП 32×25, схема которой показана на рис. 2.7.

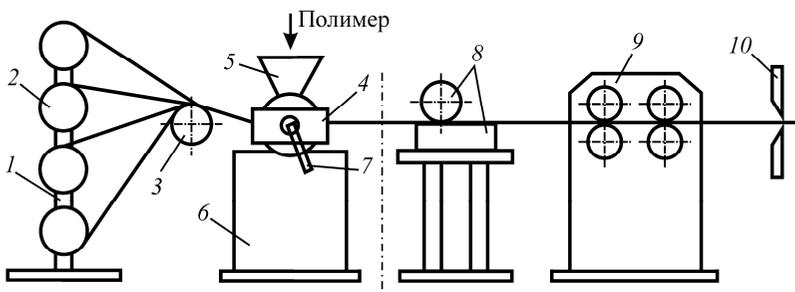


Рис. 2.7. Схема пропитки ровинга расплавом термопластичного полимера:
 1 – шпулярник; 2 – паковка стеклоровинга; 3 – направляющее устройство;
 4 – пропиточная головка; 5 – дозирующее устройство;
 6 – червячный экструдер; 7 – рычаг; 8 – формирующее устройство;
 9 – тянущее устройство; 10 – отрезное устройство

Установка включает шпулярник 1, на который помещается до восьми паковок со стеклоровингом 2. Через направляющее устройство 3 ровинг поступает в пропиточную головку 4. Гранулированный термопластичный полимер через дозирующее устройство 5 поступает в червячный экструдер 6, где плавится, гомогенизируется и подается в пропиточную головку 4. Пропитка осуществляется в головке с помощью торпеды, положение которой регулируется с помощью рычага 7. На выходе из пропиточной головки формируется стренга с определенным содержанием компонентов. Содержание компонентов задается при помощи съемных втулок. Из полученных стренг формируется лента с помощью формирующего устройства 8. Толщину и ширину ленты можно варьировать путем смены формообразующих деталей и количеством деформируемых стренг. Полученная лента протягивается с помощью тянущего

устройства 9 и разрезается на отрезки требуемой длины с помощью отрезного устройства 10.

Порядок выполнения

1. Пропитка стеклоровинга термореактивным связующим.

Стекланный ровинг заправляют в намоточное устройство, общий вид которого показан на рис. 2.8. Устанавливают с помощью тормозного устройства усилие натяжения из ряда 10, 20, 40, 80 Н, которое измеряют динамометром или специальным измерителем натяжения (предварительно проградуированным). Отклонение усилия натяжения от заданного не должно превышать ± 2 Н. Измеряют равновесную ширину волокнистого слоя, в который раскладывается ровинг на пропитывающем ролике при заданном натяжении.

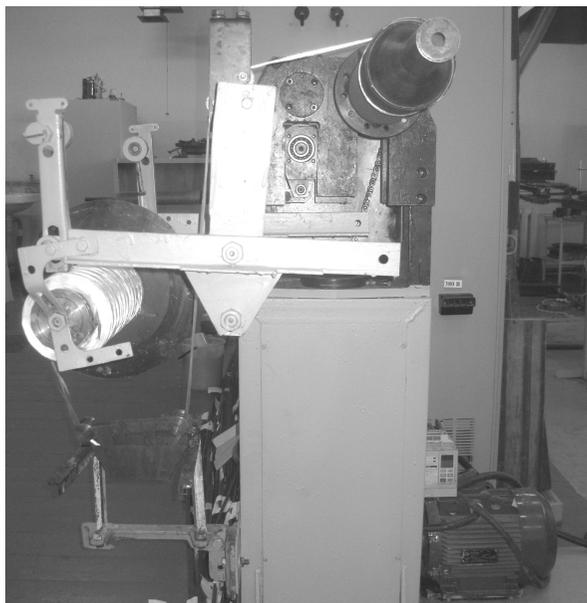


Рис. 2.8. Общий вид намоточного устройства

Заливают в пропиточную ванну предварительно подготовленное связующее с известной вязкостью. В ходе процесса пропитки контролируют уровень связующего в ванне. При необходимости связующее доливают.

Протягивают ровинг с заданными скоростями (например, 1,0; 2,0; 2,5; 4,0 м/мин) и натяжениями, наматывают кольца диаметром 160 мм, шириной 10–12 и толщиной 5–10 мм.

После полного отверждения связующего из колец вырезают образцы в виде секторов и испытывают на изгиб (см. рис. 2.5). Количество образцов не менее 3 для каждого режима изготовления. По формуле (2.21) рассчитывают прочность при сдвиге. Строят зависимость прочности при сдвиге от параметров процесса пропитки ровинга (скорости и усилия натяжения).

Используя формулу (2.3), оценивают коэффициент проницаемости волокнистого слоя, а по зависимостям (2.18), (2.19) рассчитывают область допустимых параметров процесса пропитки. При расчетах принимают показатель степени в законе течения $n = 1$. Наносят на полученный график точки, соответствующие режимам эксперимента. Дают заключение о качестве пропитки.

2. Пропитка стеклоровинга расплавом термопластичного полимера. Предварительно устанавливают по зонам экструдера и пропиточной головки температуру согласно табл. 2.1.

Стеклоровинг с линейной плотностью 2400 текс и со средним диаметром волокон 13–20 мкм пропитывают термопластичным полимерным расплавом в пропиточной головке пултрузионной установки (рис. 2.7). Получают ленту шириной 10–20 мм. Степень наполнения должна быть не менее 30% мас. В процессе получения ленты варьируют усилие натяжение ровинга, скорость протягивания.

Таблица 2.1

**Температурные режимы пропитки
стеклоровинга термопластичными полимерами**

Материал	Температура по зонам экструдера, °С			Температура по зонам головки, °С	
	I	II	III	I	II
Полипропилен	180 ± 5	220 ± 5	260 ± 5	260 ± 5	260 ± 5
Полиамид	220 ± 5	260 ± 5	280 ± 5	280 ± 5	280 ± 5
Полиэтилентерефталат	260 ± 5	280 ± 5	280 ± 5	280 ± 5	280 ± 5

Из полученной ленты изготавливают образцы с надрезами (см. рис. 2.4) и определяют прочность при сдвиге вдоль волокон по формуле (2.21). Строят зависимости прочности при сдвиге от варьируемых параметров процесса.

Используя формулу (2.3), оценивают коэффициент проницаемости волокнистого слоя, а по зависимостям (2.18), (2.19) рассчитывают область допустимых параметров процесса пропитки. Наносят на полученный график точки, соответствующие режимам эксперимента. Дают заключение о качестве пропитки.

Содержание отчета

Отчет должен включать название и цель работы, краткое описание сущности применяемого метода пропитки, схемы установок для пропитки, сведения об используемых материалах, режимы процесса пропитки, описание испытаний по определению качества пропитки, графики зависимости показателей качества пропитки от варьируемых параметров процесса пропитки, области допустимых параметров процесса пропитки.

Лабораторная работа № 2.2

ПОЛУЧЕНИЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ СТЕКЛОПОЛНЕННЫХ ЛИТЬЕВЫХ И ПРЕССОВОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Цель работы – ознакомиться с технологией получения гранулированных термопластичных материалов для литья под давлением и прессования, армированных короткими и длинными стеклянными волокнами.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Наполнение термопластичных полимеров высокопрочными волокнами позволяет значительно повысить их механические свойства и расширить область применения в изделиях конструкционного назначения. При этом в качестве армирующего наполнителя используют стеклянные, углеродные, арамидные и иные волокна. Наибольшие объемы промышленного производства приходятся на литые стеклонаполненные термопласты (СНТ). В качестве матрицы СНТ могут использоваться практически все известные термопластичные полимеры, но в большем объеме производятся

СНТ на основе полипропилена и полиамида различных марок. Волокнистые композиты с термопластичной матрицей обладают также известными экологическими и технологическими преимуществами перед композитами на основе термореактивных связующих, поэтому СНТ нашли широкое применение в различных отраслях техники. В то же время расплавы термопластичных полимеров отличаются высокой вязкостью, на 2–4 порядка превышающей вязкость растворов и расплавов термореактивных смол, используемых обычно для производства волокнистых композитов. Ввиду этого обеспечение полного и равномерного совмещения (эффективной пропитки) волокнистого наполнителя с термопластичным полимером и получение однородного по структуре материала представляет собой достаточно сложную техническую задачу.

Наиболее распространенный метод формообразования изделий из наполненных волокнами термопластов – литье под давлением. Для переработки в изделия методом литья под давлением наполненные волокнами термопласты применяют в виде гранул. Гранулы наряду с основными компонентами – наполнителем и матричным полимером – содержат функциональные добавки. В зависимости от требований к изделиям в матрицу могут быть введены красители, антипирены (вещества замедляющие горение), аппреты и иные ингредиенты, придающие материалу необходимые свойства.

В зависимости от длины волокон в гранулах различают коротковолокнистые (со средней длиной волокон до 1 мм) и длиноволокнистые (со средней длиной волокон более 5 мм) литьевые СНТ. Их получают по разным технологическим схемам.

К наиболее ранним относится так называемая кабельная технология получения СНТ. Стеклонити или ровинг протягивают через головку экструдера, в которую подают расплав термопластичного полимера. Головка снабжена калиброванными отверстиями, обеспечивающими заданное соотношение компонентов. Полученные таким образом стренги после охлаждения разрубают на гранулы [7].

Под воздействием высоковязкого расплава пучок волокон (нити или ровинг), находящийся в головке, сжимается, препятствуя проникновению полимера вглубь сечения, поэтому гранулы оказываются неоднородными. Гомогенизация композита происходит уже в процессе литья изделия.

Экструзионная технология обеспечивает получение более однородного литьевого материала. По этому методу в одношнековый

или чаще двухшнековый экструдер вводят одновременно матричный полимер и волокнистый наполнитель. Волокнистый наполнитель предварительно разрезают на отрезки длиной от 3 до 12 мм. Может подаваться и непрерывный ровинг, тогда его измельчение происходит уже в экструдере. Возможны и другие варианты метода. Выбор варианта зависит от желаемой длины и однородности распределения волокон в гранулах [7].

При изготовлении СНТ червячный экструдер используют в качестве пластилятора и смесителя. Смесительный эффект червячного экструдера характеризуется накопленной деформацией сдвига в зоне дозирования [1, 8]. Деформации сдвига неоднородны по сечению канала червяка, поэтому для оценки смесительного эффекта используют среднее значение деформации сдвига за время пребывания материала в зоне дозирования или распределение деформации сдвига по сечению. При этом обычно принимают линейный закон течения расплава [8, 9]. Получены решения и для нелинейного (степенного) закона течения [1].

В процессе экструдирования в результате сдвигового деформирования расплава происходит не только смешение волокон и полимера, но и разрушение волокон под действием давления, изгибающих и сдвигающих усилий, возникающих как в зоне питания, так и в зоне плавления. Средняя длина волокон в гранулах оказывается значительно меньше, чем исходная длина волокон, загружаемых в экструдер. Среднее значение и коэффициент вариации длины волокон характеризуют диспергирующее воздействие экструдера при получении гранул литьевых СНТ.

От длины волокон зависят механические свойства СНТ. Модуль упругости и разрушающие напряжения возрастают практически пропорционально средней длине волокон, поэтому коротковолокнистые СНТ по механическим свойствам значительно уступают длиноволокнистым литьевым (ДЛМ) и прессовочным (ДПМ) материалам, изготовленным из тех же компонентов. Другой важный аргумент в пользу ДЛМ и ДПМ – повышенный износ рабочих поверхностей литьевой машины и литьевых форм при переработке коротковолокнистых СНТ. При использовании ДЛМ вероятность и, следовательно, интенсивность воздействия торцов волокон (а именно они приводят к износу) значительно меньше. Во-первых, число торцов уменьшается обратно пропорционально длине волокон (при равном их содержании в материале). Во-вторых, чем

больше длина волокна, тем менее вероятно его положение перпендикулярно формообразующей поверхности, поскольку под действием потока расплава волокна ориентируются преимущественно параллельно этим поверхностям.

Для получения ДЛМ и ДПМ используется пултрузионная технология [1]. С целью повышения качества совмещения непрерывных волокнистых наполнителей с высоковязкими расплавами термопластичных полимеров при получении ДЛМ используют различные технологические приемы:

- 1) раскладывание подлежащих пропитке однонаправленных пучков волокон в тонкий слой и разделение волокнистого слоя на ленты;
- 2) снижение вязкости и создание повышенного давления полимерного расплава на поверхности пропитываемой волокнистой ленты;
- 3) перегруппировка волокон в пучке в процессе пропитки, в частности путем протягивания в скользящем контакте с криволинейной поверхностью отклоняющих элементов и калибрующих отверстий.

Для более глубокой и равномерной пропитки волокнистых пучков перечисленные приемы применяют в различных комбинациях и в совокупности. В процессе изготовления непрерывно армированных термопластичных полимерных материалов по пултрузионной технологии пучки волокон (ровингов) раскладывают в равномерный и тонкий (плоский) слой с помощью стержней, расположенных в головке, слой разделяют на ленты, протягивают через поперечную головку экструдера, в которую под относительно высоким давлением подают расплав полимера, и далее пропускают через калиброванные выходные отверстия.

При протягивании лент в плоскощелевых каналах пултрузионной пропиточной головки, заполненных расплавом полимера, сжатие волокнистого слоя под давлением расплава способствует удалению воздуха из порового пространства волокнистой системы. Давление в щелевом канале увеличивается за счет нагнетания расплава движущимся волокнистым слоем. Протягивание лент в контакте с криволинейными поверхностями отклоняющих элементов способствует улучшению качества материала за счет уменьшения толщины пропитываемого слоя и перегруппирования волокон. В результате обеспечивается более полная и равномерная пропитка волокнистого наполнителя и, соответственно, однородная структура получаемого материала.

Стренги, изготовленные методом пропитки непрерывного волокнистого наполнителя расплавом полимера, разрезают на гранулы длиной 8–12 мм. Параметры распределения длины и размеров сечения гранул и параметры распределения относительной доли наполнителя в гранулах характеризуют однородность ДЛМ (ДПМ).

Степень наполнения СНТ волокнами и, следовательно, содержание наполнителя в гранулах выбирают в зависимости от конструкции и назначения изделия, обычно в диапазоне от 20 до 50% мас. Точность дозирования наполнителя обеспечивают соответствующим подбором диаметра калибрующих фильер и режима истечения. Имеется различие в режимах истечения через фильеры при получении литьевых СНТ по экструзионному и пултрузионному методам.

При экструзии стренг, наполненных короткими волокнами, режим истечения практически не влияет на содержание наполнителя. При протягивании непрерывного наполнителя через фильеры ввиду неоднородности заполнения полимером сечения стренги расход полимера зависит не только от скорости протягивания, но и от давления в головке и вязкости расплава.

Течение расплава в зазоре между пропитанным полимером пучком волокон и поверхностью фильеры аналогично течению в кольцевом зазоре кабельной головки [8]. Расход расплава через зазор определяется вынужденным потоком, обусловленным движением срединного стержня, и потоком, вызванным давлением в головке. Варьируя параметры процесса, в первую очередь, давление расплава в головке и скорость протягивания стренги, можно управлять степенью наполнения полимера волокнами. При этом текущий контроль содержания наполнителя может осуществляться по массе стренги мерной длины. Для определения содержания стеклонаполнителя в гранулах (как коротковолокнистого, так длиноволокнистого СНТ) используют метод выжигания матричного полимера.

Показатели однородности СНТ имеют статистическую природу, поэтому при их оценке используют статистические методы.

Числовые характеристики распределения – среднее значение, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации – определяют по значениям в выборке. Для среднего оценивают доверительный интервал.

Однородность гранул коротковолокнистого литьевого материала и стренг по массовой доле наполнителя оценивают с помо-

щью дисперсионного анализа или путем проверки гипотезы об однородности дисперсий в двух выборках объемом m и n по критерию Фишера [10].

Пусть D_1 – дисперсия показателя в выборке 1 объемом n ; D_2 – дисперсия показателя в выборке 2 объемом m ; D_{\max} – наибольшее значение; D_{\min} – наименьшее значение, тогда значение критерия Фишера для данных выборок

$$F = \frac{D_{\max}}{D_{\min}}. \quad (2.22)$$

Если $F < F(n - 1, m - 1)$, то гипотеза об однородности принимается. Значения критерия $F(n - 1, m - 1)$ при заданном уровне значимости p приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

**Значения критерия Фишера (F -критерия)
для уровня значимости $p = 0,05$**

f_2	f_1										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
1	161,45	199,50	215,71	224,58	230,16	233,99	236,77	238,88	240,54	241,88	245,95
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,43
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,70
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,86
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,62
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	3,94
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,51
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,22
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,01
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,85
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,72
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,62
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,53
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,46
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,40
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,35
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,31
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,27
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,23
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,20

Для поперечных размеров и длины гранул ДЛМ (ДПМ), а также для длины стеклянных волокон в гранулах коротковолокнистого

литьевого материала строят гистограмму и находят подходящее распределение (нормальное, логарифмически нормальное или Вейбулла).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Оборудование и материалы. Для получения ДЛМ (ДПМ) используют стеклоровинг с линейной плотностью 2400 текс и диаметром элементарного волокна 13 или 20 мкм. В качестве связующего используют полипропилен, полиамид или полиэтилентерефталат с ПТР не менее 20 г/10 мин.

Изучение процесса получения ДЛМ осуществляют на универсальной пултрузионной установке на базе червячного экструдера ЧП 32×25, схема которой показана на рис. 2.9.

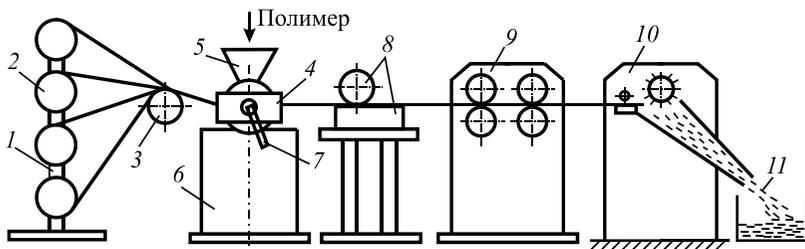


Рис. 2.9. Схема получения ДЛМ (ДПМ):

1 – шпулярник; 2 – паковка стеклоровинга;

3 – направляющее устройство;

4 – пропиточная головка; 5 – дозирующее устройство;

6 – червячный экструдер; 7 – рычаг; 8 – ванна;

9 – тянущее устройство; 10 – гранулятор; 11 – емкость

Установка включает шпулярник 1, на который устанавливается до восьми паковок со стеклоровингом 2. Через направляющее устройство 3 ровинг поступает в пропиточную головку 4. Гранулированный термопластичный полимер через дозирующее устройство 5 поступает в червячный экструдер 6, где плавится, гомогенизируется и подается в пропиточную головку 4. Пропитка осуществляется в головке с помощью торпеды, положение которой регулируется с помощью рычага 7.

На выходе из пропиточной головки формируется стренга с определенным содержанием компонентов. Содержание компонентов задается при помощи съемных втулок. Стренги охлаждаются в ванне 8, протягиваются с помощью тянущего устройства 9 и разрезаются на отрезки требуемой длины с помощью гранулятора 10. Готовый ДЛМ падает в емкость 11.

Порядок выполнения

Задают согласно технологическому регламенту режимы работы экструдера ЧП 32×25, температуру по зонам, температуру пропиточной головки, скорость протягивания стренг и частоту вращения фрезы гранулятора экспериментальной пултрузионной установки. В головку предварительно вводят стеклоровинг и устанавливают калибрующие фильеры, соответствующие содержанию наполнителя 20, 30 или 40% мас.

После выхода установки на стационарный режим через проемжутки времени 3–5 мин отрезают стренги длиной по 1 м с точностью до 2 мм (всего по 3–5 образцов из каждой стренги). Образцы взвешивают с точностью до 0,1 г. Вычисляют массовую долю стеклонаполнителя в стренгах, используя формулу

$$C_n = \frac{1000m}{T},$$

где m – масса 1 м стренги, г; T – линейная плотность наполнителя, текс.

С использованием пакета Mathcad или Excel вычисляют параметры распределения (среднее значение, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации), а также доверительные интервалы для среднего значения массовой доли стеклонаполнителя для выборки образцов каждой стренги (по времени) и для стренг, выходящих из разных фильер (пучка одновременно вырезанных стренг). С помощью критерия Фишера (2.22) проверяют гипотезу об однородности стренг по времени получения и положению калибрующей фильеры.

Измеряют длину не менее 100 гранул ДЛМ, отобранных случайным образом (после перемешивания) с погрешностью не более 0,1 мм. Строят гистограмму и подбирают закон распределения длины гранул. Аналогичным образом определяют размеры поперечного сечения (наибольший и наименьший) и подбирают закон распределения.

Содержание отчета

Отчет должен включать название и цель работы, краткое описание процесса получения ДЛМ (ДПМ), схему пултрузионной установки, сведения об используемых материалах, режимы процесса получения ДЛМ, результаты определения параметров распределения массовой доли стеклонаполнителя, результаты подбора закона распределения размеров гранул ДЛМ, выводы об однородности полученного ДЛМ (ДПМ).

Лабораторная работа № 2.3

ПЛАСТИКАЦИЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ В ЧЕРВЯЧНОМ ЭКСТРУДЕРЕ

Цель работы – изучить процесс пластикации термопластичных композиций в червячном экструдере, установить влияние параметров процесса на длину волокон при пластикации стеклонаполненных термопластичных композиций.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В технологии КМ червячные экструдеры используют для совмещения термопластичных матричных полимеров в вязкотекучем состоянии с дисперсными наполнителями при получении компаундов, гранулированных литьевых и прессовочных материалов, листовых или профильных заготовок. Термопластичные полимеры сначала переводят в вязкотекучее состояние, поэтому одна из важных, а во многих случаях и основных функций экструдера – пластикация материала. Предварительная пластикация в экструдере используется при литье под давлением, прессовании высоконаполненных термопластичных композиций и других технологических процессах получения изделий [1].

В зависимости от конструкции основного рабочего органа, используемого для создания давления и перемещения материала, различают червячные (с одним или двумя червяками), плунжерные, дисковые и комбинированные экструдеры. Червячные экс-

трудеры (называемые также червячными прессами или шнековыми пластикаторами) применяют намного чаще других.

Основные стадии экструзии – подача материала в экструдер, транспортирование его в канале червяка, уплотнение, разогрев и плавление (пластикация), смешивание и выдавливание. В зависимости от явлений, преобладающих на различных участках по длине червяка, выделяют следующие три основные зоны: зону питания (загрузки), зону уплотнения и плавления (пластикации) и зону смешивания (дозирования).

Расплавы термопластичных матричных полимеров, наполненных твердыми частицами, оказывают более высокое сопротивление сдвиговому деформированию. Поэтому при переработке высоконаполненных композиций принимают меры, позволяющие повысить эффективность экструдера как смесителя и пластикатора. При червячной экструзии высоконаполненных композиций цилиндры выполняют с пазами в зоне загрузки. Для повышения однородности композиций используют червяки с диспергирующими элементами – проточками, смещенными каналами, кулачками, зубьями, прорезьями, торпедами с гладкими участками или обратной нарезкой.

При пластикации стеклонеполненных термопластичных композиций длинные волокна наиболее интенсивно разрушаются в зоне питания, где возрастает давление, а матричный полимер находится еще в твердом состоянии, и на выходе из экструдера, где сильно изменяется профиль потока, а короткие волокна более интенсивно разрушаются в зоне плавления.

После появления пленки расплава волокна прилипают к поверхности цилиндра и испытывают значительные нагрузки со стороны матричного полимера, имеющего высокую вязкость и деформируемого только в тонкой прослойке. Высокие значения градиентов скоростей деформации в поверхностном слое и соответственно касательных напряжений являются причиной повреждения волокон. В зоне дозирования вязкость матричного полимера существенно ниже, поэтому волокна разрушаются менее интенсивно. Характер взаимодействия матричного полимера с частицами наполнителя таков, что меры, способствующие повышению однородности композиции, приводят одновременно к более строгой ориентации частиц и более интенсивному их разрушению.

Наличие различных механизмов разрушения волокон обуславливает вид кривых распределения длины волокон: из исходного

одномодального распределение переходит в двухмодальное в зоне плавления и затем снова в одномодальное на выходе из зоны дозирования (рис. 2.10).

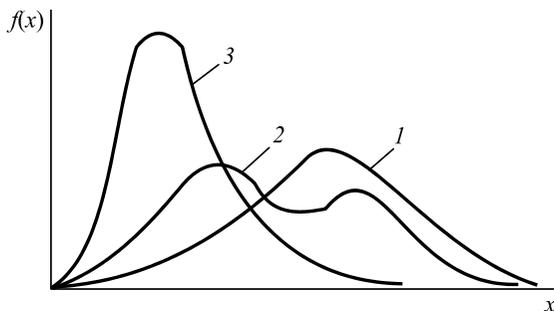


Рис. 2.10. Плотности распределения длины волокон: 1 – исходная; 2 – в зоне плавления; 3 – на выходе [1]

Степень измельчения волокон возрастает с увеличением относительной длины червяка и частоты его вращения.

Распределение длины стеклянных волокон в композиции на выходе из червячного экструдера близко к распределению Вейбулла:

$$f_{\delta}(x) = mqx^{q-1} \exp\left[-(mx^q)\right], \quad (2.23)$$

где m и q – параметры распределения.

В зависимости от вязкости расплава, прочности волокон и интенсивности сдвигового воздействия параметры распределения могут существенно различаться. Параметр q распределения Вейбулла, определяющий однородность распределения, для экструдруемых стеклонаполненных композиций находится в диапазоне от 0,5 до 1,5 [11]. Средняя длина волокон уменьшается с увеличением вязкости матричной жидкости (рис. 2.11).

Из анализа явлений, обуславливающих измельчение волокон в экструдере, вытекают некоторые практические рекомендации по сохранению длины волокон в стеклонаполненных композициях. Целесообразно использовать червяки с уменьшенной длиной ($L/D = 18-22$) и увеличенной до $L_1 = (0,5-0,6)L$ длиной зоны питания. Длина зоны плавления при этом $L_{II} = (0,20-0,35)L$, а зоны дозирования $L_{III} \sim 0,2L$. Рекомендуется увеличить глубину канала до 5 мм и степень сжатия до 1,8–2,5.

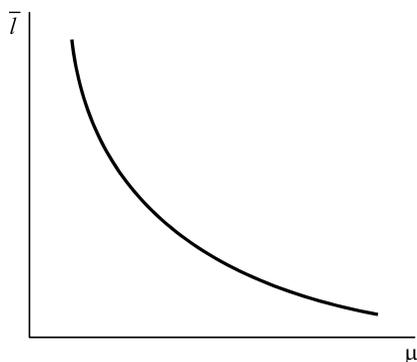


Рис. 2.11. Зависимость средней длины волокон от вязкости расплава матричного полимера

Во избежание возврата расплава червяк снабжают обратным клапаном с увеличенным проходным сечением. Частоту вращения следует уменьшить до 40–60 об./мин, а температуру зон, в том числе зоны питания, напротив, увеличить на 10–20°C по сравнению с оптимальной температурой пластикации ненаполненного матричного полимера. Увеличивая температуру зон цилиндра, учитывают, что максимальная температура расплава не должна превышать температуру термической деструкции полимера [1].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материал. Для пластикации используют гранулы длинноволокнистого стеклонаполненного литьевого материала (ДЛМ) на основе стеклоровинга с линейной плотностью 2400 текс и термопластичного связующего (полиамида, полипропилена или полиэтилентерефталата). Длина гранул 8–12 мм. Степень наполнения 20–40% мас.

Оборудование. Для получения образцов пластицированной композиции в качестве пластикатора используют одночервячный экструдер ЧП 32×25 со сменным комплектом из трех червяков с различной геометрией. Для выжигания образцов используют печь типа SNOL 8,2/1100.

Для изучения длины стеклянных волокон после пластикации в червячном экструдере используют микроскоп.

Порядок выполнения

Распределение длины волокон в исходной композиции получают по результатам измерения штангенциркулем представительной выборки (не менее 100 шт.) гранул ДЛМ. Полученные значения разбивают на 8–12 равных интервалов. Вычисляют среднее значение, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации длины гранул. Строят гистограмму распределения и определяют параметры распределения Вейбулла (см. формулу (2.23)).

Устанавливают температуру по зонам экструдера в зависимости от материала (табл. 2.1). После прогрева предварительно просушенный материал (ДЛМ) загружают в бункер-дозатор. Включают вращение червяка (частота вращения 130 об./мин). На выходе из экструдера формируют навески массой 10–20 г пластицированной композиции и охлаждают их на воздухе. Полученные навески помещают в предварительно нагретую до 500–600°C печь и выжигают в течение 40–60 мин. Полученные таким образом образцы с волокнистой фракцией помещают под микроскоп и измеряют длину не менее чем 100 волокон. Вычисляют среднее значение, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации длины волокон. Строят гистограмму распределения и определяют параметры распределения Вейбулла (см. формулу (2.23)).

Эксперимент повторяют при двух других значениях частоты вращения червяка, отличающихся друг от друга не менее чем на 20 об./мин, и при установке двух других червяков.

Строят зависимости средней длины волокон в композиции от частоты вращения червяка и его геометрии. Дают заключение о влиянии режимов пластикации и геометрии червяка на среднюю длину волокон в получаемой композиции.

Содержание отчета

Отчет должен включать название и цель работы, краткое описание устройства и принципа работы червячного экструдера ЧП 32×25, режимы процесса пластикации, параметры распределения Вейбулла для исходной длины волокон и длины после пластикации, зависимости средней длины волокон от параметров процесса пластикации и геометрии червяка.

КОНСОЛИДАЦИЯ МАТЕРИАЛА

Лабораторная работа № 3.1

УПЛОТНЕНИЕ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы – изучить процессы уплотнения волокнистых наполнителей и наполненных композиций в вязкотекучем состоянии, ознакомиться с методикой экспериментального определения параметров законов уплотнения.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Консолидацию (от латинского *concolidatio* – упрочнение, укрепление, объединение) в технологии КМ рассматривают как совокупность механических и физико-химических процессов, приводящих к образованию монолитного материала, т. е. материала, обладающего плотной и прочной структурой. Из определения следует, что по крайней мере два параметра – плотность материала и прочность связи его элементов (аутогезионная и когезионная) – характеризуют данную стадию, а их зависимость от времени – кинетику процесса (рис. 3.1).

К основным явлениям, приводящим к уплотнению материалов, обычно относят сближение частиц, их упругие и вязкопластические деформации, заполнение промежутков между частицами и объемное сжатие [1]. В процессах формообразования изделий из КМ уплотнение материала происходит в результате упругой и пластической деформации наполнителя, вязкого течения матричной жидкости и ее перколяции через поровое пространство. Источниками давления служат как приложенные внешние силы, так и поверхностное натяжение матричной жидкости.

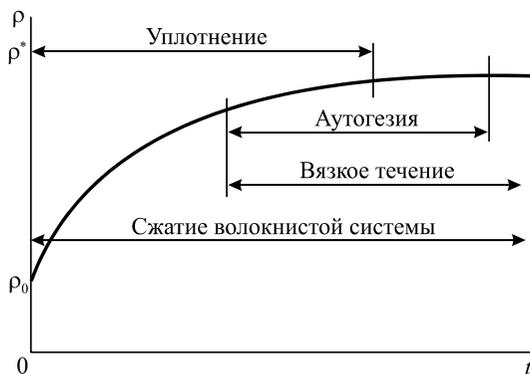


Рис. 3.1. Изменение плотности КМ в процессе формообразования изделия [12]

Упругие деформации волокнистой системы. Волокна, нити, гранулы, стренги или ленты препрега на начальной стадии формообразования контактируют между собой, создавая каркас с упорядоченной или стохастической структурой. Под действием давления волокнистая система деформируется, при этом занимаемый ею объем уменьшается. В качестве элемента структуры рассмотрим сначала отдельное волокно. Простейшая схема деформирования волокна показана на рис. 3.2.

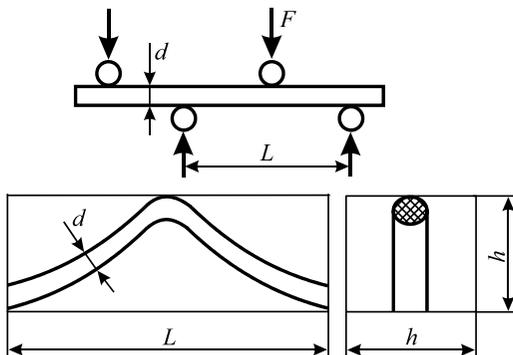


Рис. 3.2. Модель деформирования волокна при уплотнении волокнистого слоя [12]

Объем элементарной ячейки, содержащей типичный отрезок волокна длиной L , равен $V = Lh^2$, где h – размер поперечного сече-

ния ячейки (рис. 3.2). Относительная длина ячейки $L / d = k_l \delta$, где k_l – геометрический параметр; $\delta = \sqrt{P^* / P_B} - 1$ (P^* – предельная степень заполнения ячейки; для модели с квадратным расположением волокон $P^* = \pi / 4$; P_B – доля объема, заполненного волокном).

Изменение размеров элементарной ячейки в процессе деформирования приводит к изменению доли ее объема, занимаемого волокном. Относительная деформация ячейки связана с изменением объемной доли волокон соотношением $\varepsilon = (h_0 - h) / h_0 = 1 - \sqrt{P_B / P_0}$, где P_0 – исходная объемная доля волокон.

Сила F , приложенная к элементарной ячейке, создает среднее давление $p = F / (Lh)$. Прогиб волокна диаметром d как неразрезной балки с длиной пролета L под действием силы F , приложенной в середине пролета, равен

$$f = \frac{FL^3}{192EI_x} = \frac{F}{3\pi EL} \left(\frac{L}{d} \right)^4, \quad (3.1)$$

где E – модуль Юнга; I_x – момент инерции сечения волокна.

При прогибе волокна f относительное изменение объема ячейки составит $\varepsilon = f / (4h)$. Учитывая это, а также записанные выше соотношения между величинами, входящими в формулу (3.1), получаем следующее выражение зависимости между давлением и объемной долей волокон [12]:

$$p = 3\pi E k_l^{-4} \left(\sqrt{\frac{P_B}{P_0}} - 1 \right) \left(\sqrt{\frac{P^*}{P_B}} - 1 \right)^4. \quad (3.2)$$

Зависимость объемной доли волокон от давления, вытекающая из формулы (3.2), характеризует кинетику уплотнения волокнистого слоя.

Уплотнение вязкопластичного слоя. Допустим, что между скоростями приложения давления p и изменения объема V при сжатии слоя препрега, гранул, находящихся в вязкопластичном состоянии, существует линейная зависимость:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{B_V}{V} \frac{dV}{dt}, \quad (3.3)$$

где B_V – коэффициент, зависящий от свойств материала.

В случае одномерной деформации, связанной только с изменением толщины слоя h при неизменной его площади A , запишем $dV / dt = A(dh / dt)$. Тогда, интегрируя уравнение (3.3), имеем

$$p = B_V \ln \frac{h}{h_0}, \quad (3.4)$$

где h_0 – начальная высота слоя.

Вместо соотношения (3.4) чаще используют зависимость давления от пористости в виде

$$p = B_{\Pi} \ln \frac{\Pi_0}{\Pi}, \quad (3.5)$$

где B_{Π} – параметр, зависящий от вязкопластических свойств материала; Π_0 – исходная пористость слоя (при насыпной плотности ρ_0); Π – пористость при давлении p .

Подставив в выражение (3.5) плотность $\rho = \rho^*(1 - \Pi)$, где ρ^* – предельная плотность (плотность монолитного материала), получим

$$\rho = \rho^* - (\rho^* - \rho_0) \exp\left(-\frac{p}{B_{\Pi}}\right). \quad (3.6)$$

Предельную плотность ρ^* находят по плотности компонентов и их массовым долям [1, 3], исходную (насыпную) плотность ρ_0 – по начальному объему и массе слоя, а параметр B_{Π} по экспериментальной (линейной) зависимости между логарифмом относительной пористости $\Pi / \Pi_0 = (\rho^* - \rho) / (\rho^* - \rho_0)$ и давлением p .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы. Для исследования упругих деформаций и процесса уплотнения в вязкопластичном состоянии используют навески волокнистых материалов: стеклоровинг с линейной плотностью 2400 или 5200 текс; ДЛМ на основе стеклоровинга с линейной плотностью 2400 текс и термопластичного связующего (полипропилена или полиамида).

Стеклоровинг предварительно разрезают на отрезки длиной 20–40 мм. Длина гранул ДЛМ 8–12 мм.

Количество навесок – не менее трех на каждый режим испытаний.

Оборудование. Процессы уплотнения исследуют с помощью пресс-формы с внутренним диаметром 50 мм (рис. 3.3).

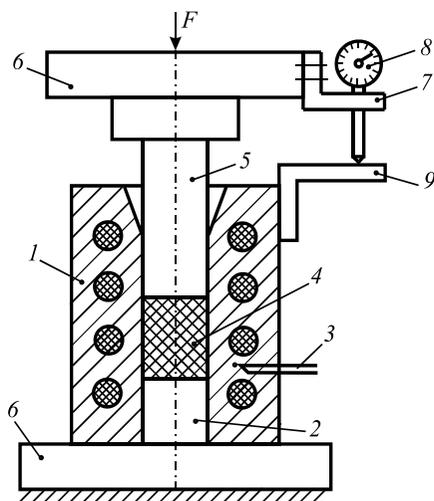


Рис. 3.3. Схема исследования процесса уплотнения:
 1 – обогреваемый корпус; 2 – цилиндрический вкладыш;
 3 – термопара; 4 – навеска материала; 5 – пуансон;
 6 – плиты пресса; 7 – кронштейн;
 8 – индикатор часового типа; 9 – кронштейн

Пресс-форма состоит из обогреваемого корпуса 1, в который устанавливается цилиндрический вкладыш 2. Необходимая для испытаний температура обеспечивается системой терморегулирования и контролируется с помощью термопары 3. Исследуемая навеска 4 помещается между вкладышем и пуансоном 5. Пресс-форма помещается между плитами 6 гидравлического пресса ИП-100, с помощью которого создается необходимое усилие. На верхней плите пресса на кронштейне 7 установлен индикатор 8 часового типа ИЧ-10, фиксирующий изменение высоты навески в процессе прессования. Конец индикатора упирается в кронштейн 9, закрепленный на корпусе пресс-формы.

Порядок выполнения

1. Изучение упругих деформаций при сжатии волокнистого слоя. Предварительно подготовленную навеску стеклоровинга или гранул ДЛМ взвешивают с точностью до 0,1 г и загружают в пресс-форму (температура $20 \pm 5^\circ\text{C}$), распределив материал равномерно по площади формы. Высота навески стеклоровинга должна составлять

около 10 мм, навески гранул – 10–20 мм. Устанавливают пуансон и помещают пресс-форму между плитами гидравлического пресса, как показано на рис. 3.3. Измеряют начальную высоту навески. Конец индикатора приводят в соприкосновение с кронштейном, закрепленным на корпусе формы. Положение индикатора регулируют таким образом, чтобы свободный ход его штока был не менее 8–9 мм. Устанавливают показания индикатора на ноль. Постепенно увеличивая нагрузку, фиксируют значение высоты навески с помощью индикатора (для ровинга максимальная нагрузка до 10 кН, для гранул – до 50 кН). Предельную нагрузку подбирают так, чтобы не происходило значительного повреждения материала.

По значениям усилия и высоты навески, используя пакеты Mathcad или Excel, строят экспериментальную зависимость объемной доли волокон (гранул) от давления. Используя формулу (3.2), строят теоретическую зависимость объемной доли волокон (гранул) от давления, подбирая подходящее значение геометрического параметра β .

Сравнивают поведение волокнистого материала и гранул при уплотнении, устанавливают соответствие экспериментальной зависимости объемной доли волокон от давления теоретической зависимости, вытекающей из формулы (3.2).

2. Исследование процесса уплотнения в вязкотекучем состоянии. Предварительно нагревают пресс-форму до температуры $T_1 = T_n + 20^\circ\text{C}$, где T_n – температура плавления матричного полимера. Точность задания температуры $\pm 2^\circ\text{C}$. Взвешенную с точностью до 0,1 г навеску гранул ДЛМ загружают в пресс-форму, распределив материал равномерно по площади формы. Устанавливают пуансон и выдерживают для прогрева навески до температуры испытания (около 3–5 мин). Помещают пресс-форму между плитами гидравлического пресса, как показано на рис. 3.3. Измеряют начальную высоту навески. Конец индикатора приводят в соприкосновение с кронштейном, закрепленным на корпусе формы. Положение индикатора регулируют таким образом, чтобы свободный ход его штока был не менее 8–9 мм. Устанавливают показания индикатора на ноль. Постепенно увеличивая нагрузку, фиксируют значение высоты навески с помощью индикатора. Нагрузку прекращают после достижения квазиравновесного состояния, например такого, когда приложение очередной ступени нагрузки, составляющей не менее 5% от номинальной, приводит к изменению толщины слоя менее чем на 0,5%. При этом не должно происходить выдавливания материала через зазор между пуансоном и корпусом пресс-формы.

По конечному значению толщины слоя, массе навески и размерам пресс-формы вычисляют предельное значение плотности материала, сравнивают его с рассчитанным по значениям плотности и объемной доли компонентов. Определяют параметры закона уплотнения (3.6), используя пакеты Mathcad или Excel. По значению дисперсии отклонений экспериментальных значений плотности от расчетных оценивают степень соответствия закона уплотнения по формуле (3.6).

Эксперимент повторяют еще при двух значениях температуры, отличающихся друг от друга не менее чем на 15–20°C.

Оценивают влияние температуры на процесс уплотнения и параметры закона уплотнения.

Содержание отчета

Отчет должен включать название и цель работы, краткое описание и схему процесса уплотнения, сведения об используемых материалах, режимах прессования, таблицы с промежуточными результатами (значениями усилия прессования и высоты навески), графики зависимости объемной доли волокон (гранул) от давления, плотности материала от усилия прессования, параметры законов уплотнения и зависимости их от температуры.

Лабораторная работа № 3.2

СПЛАВЛЕНИЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ СТРЕНГ

Цель работы – ознакомиться с механизмами консолидации под действием сил поверхностного натяжения.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Консолидация термопластичных полимеров или композиций с термопластичной матрицей включает *сплавление* (спекание), т. е. соединение расплавленных частиц, их уплотнение и формирование прочной аутогезионной связи между частицами, и *структурные превращения*, определяющие режимы процесса, свойства материала в изделии и влияющие в значительной мере на геометрию

изделия. Сплавление происходит под действием сил поверхностного натяжения расплава матричного полимера и (или) внешних сил (давления).

Рассмотрим модель сплавления двух цилиндрических стренг (рис. 3.4).

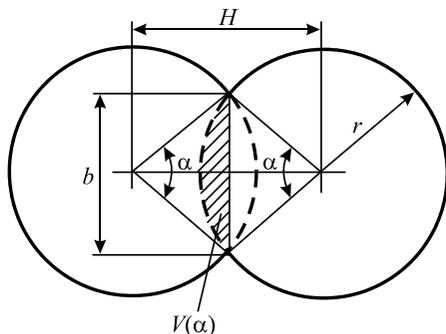


Рис. 3.4. Схема сплавления термопластичных стренг

Работа сил поверхностного натяжения равна $A_s = -\sigma_s dS / dt$, где σ_s – поверхностное натяжение; S – свободная поверхность, зависящая от текущих значений r и H ; dS / dt – скорость ее изменения [1].

Пусть r – радиус стренги; b – ширина участка контакта, ограниченного дугой, опирающейся на центральный угол α . При этом учитывается, что расстояние между осями стренг H уменьшается, а радиус стренг r увеличивается.

Зависимость величин H и r от угла α находится из геометрических соображений:

$$H(\alpha) = 2r(\alpha) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right); \quad r(\alpha) = r_0 \sqrt{[\pi - 0,5(\alpha - \sin \alpha)]^{-1}}, \quad (3.7)$$

где r_0 – начальный радиус стренги.

Деформируемый объем и площадь свободной поверхности, отнесенные к единице длины, равны $V(\alpha) = r^2(\alpha - \sin \alpha) / 2$; $S(\alpha) = r(\alpha)(2\pi - \alpha)$ и из условия несжимаемости $\pi r_0^2 = \pi r^2 - V(\alpha)$.

Пусть закон вязкого течения расплава при сплавлении стренг задан степенной функцией $\sigma = \eta \dot{\epsilon}^n$, где σ – нормальное напряжение; η – коэффициент консистенции при растяжении расплава; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации; n – параметр. Тогда удельная работа деформирования равна $A_v = 2\eta \dot{\epsilon}^{n+1} V$.

Приравняем работу деформирования A_V к работе сил поверхностного натяжения A_s , выразим все геометрические величины как функции угла α и проинтегрируем полученное уравнение, разделяя переменные (при условии, что $s = 1/n = \text{const}$ относительно t). В результате найдем связь между геометрическими параметрами модели и условиями консолидации:

$$\int_0^{\alpha^*} \left(\frac{V(\alpha)}{r_0} \right)^s \left(\frac{dr(\alpha)}{d\alpha} \right)^{s+1} \left(\frac{dS}{d\alpha} \right)^{-s} d\alpha = \left[\frac{\sigma_s}{r_0 \eta(T)} \right]^s t^*. \quad (3.8)$$

Безразмерный комплекс в правой части этого выражения содержит все основные параметры процесса. Подставив в него вязкость при сдвиге, получим

$$Z(t^*) = \left[\frac{\sigma_s}{r_0 \mu(T)} \right]^s t^*. \quad (3.9)$$

Примем в качестве степени уплотнения элементарной ячейки с размером $2r \times H$ долю площади сечения, заполненной полимером. Получим

$$c(\alpha) = \frac{\pi r^2(\alpha) - V(\alpha)}{2r(\alpha)H(\alpha)}. \quad (3.10)$$

Задавая согласно уравнению (3.8) значения угла α^* , можно получить зависимость степени уплотнения от безразмерного комплекса параметров $Z(t^*)$. Вид этой зависимости показан на рис. 3.5.

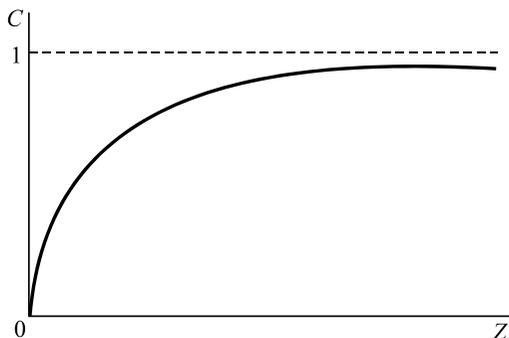


Рис. 3.5. Зависимость степени консолидации от безразмерного комплекса параметров $Z(t^*)$

Как показывает анализ формулы (3.8), для консолидации стренг при действии только сил поверхностного натяжения требуется весьма длительный период контакта.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы. Для изучения процесса сплавления используют стренги (желательно правильной цилиндрической формы) на основе стеклоровинга с линейной плотностью 2400 текс и термопластичного связующего (полипропилена или полиамида). Степень наполнения 20–40% мас. Длина стренг 150–200 мм.

Оборудование. Лабораторный штатив, ИК-нагреватель, катетометр.

Порядок выполнения

Две стренги закрепляют в вертикальном положении на лабораторном штативе, как показано на рис. 3.6. Для того чтобы исключить коробление стренг в процессе нагрева и испытаний, на свободный конец стренг можно подвесить груз массой 200–500 г. Стренги помещают между ИК-нагревателями. Нагревают до температуры, превышающей температуру плавления полимера T_n на 20°C. Температуру контролируют с помощью термопары. После этого стренги приводят в соприкосновение и выдерживают в таком положении 1, 2, 5, 10 мин. Затем их охлаждают и измеряют толщину сдвоенных стренг с точностью до 0,05 мм с помощью штангенциркуля или катетометра. Испытания повторяют еще при двух значениях температуры, отличающихся друг от друга не менее чем на 15–20°C.

Строят зависимость сближения стренг от продолжительности контакта и температуры. По формулам (3.9), (3.10) определяют безразмерный комплекс параметров процесса и степень консолидации.

Строят зависимость степени консолидации от безразмерного комплекса параметров процесса и сравнивают с теоретической, рассчитанной по формуле (3.8). При вычислениях используют пакет Mathcad. Дают выводы о влиянии параметров процесса сплавления на степень консолидации.

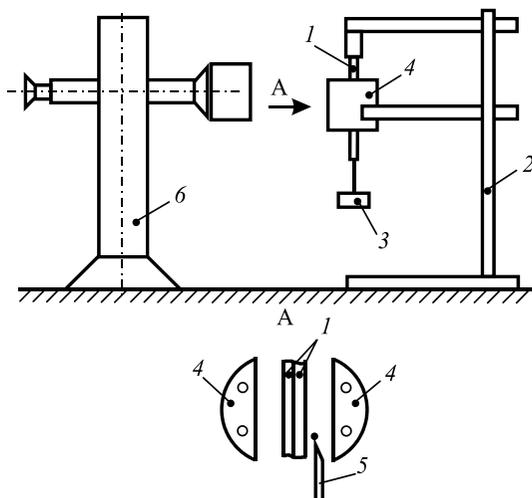


Рис. 3.6. Схема процесса сплавления:
1 – стренги; 2 – штатив; 3 – груз; 4 – ИК-нагреватель;
5 – термопара; 6 – катетометр

Содержание отчета

Отчет должен включать название и цель работы, сведения об используемых материалах, схему и сведения о режимах процесса сплавления, зависимости сближения стренг от параметров процесса сплавления, зависимость степени консолидации от безразмерного комплекса параметров процесса, выводы о соответствии экспериментальных данных теоретическим.

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ

Лабораторная работа № 4.1

ПУЛТРУЗИЯ ПРОФИЛЕЙ ИЗ АРМИРОВАННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ

Цель работы – ознакомиться с технологией процесса пултрузии изделий из армированных термопластов, изучить параметры процесса, влияющие на качество изделий.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Пултрузия – непрерывный процесс изготовления длинномерных профильных изделий путем протягивания композиции матричного полимера с непрерывными волокнами через формообразующее и консолидирующее устройство (пултрузионную головку).

Наполнителями КМ пултрудируемых изделий обычно служат непрерывные волокна (стеклянные, углеродные, арамидные или иные) в виде нитей или ровинга. Применяются также тканые (в виде ленты) и комбинированные (в виде слоев ровинга или тканей и рубленых волокон) наполнители.

В качестве связующих могут использоваться как термореактивные смолы (полиэфирные, эпоксидные, фенольные), так и термопластичные полимеры (полипропилен, полиамид, полиэтилен-терефталат, полибутилентерефталат).

Пултрудируемые изделия отличаются высокой удельной жесткостью и прочностью, поскольку материал в них имеет практически идеальную однонаправленную структуру и близкую к предельно возможной степень наполнения (до 70% об.). Дополнительный эффект упрочнения создает натяжение волокон при протягивании через формообразующий инструмент.

Методом пултрузии обычно изготавливают изделия с постоянным по длине поперечным сечением (рис. 4.1). Площадь сечения – до десятков квадратных сантиметров [1].



Рис. 4.1. Типичные сечения пултрудируемых изделий

Известны одностадийный и двухстадийный варианты технологии, по которой через профилирующую головку протягивают предварительно совмещенные компоненты, нагретые выше температуры размягчения матричного полимера.

При одностадийной пултрузии профилей (рис. 4.2) матричный полимер расплавляют в червячном экструдере, а непрерывный волокнистый наполнитель протягивают через пропиточную головку, в которую подают полимерный расплав из пластикатора. Затем сформированные в пропиточной головке стренги или ленты проводят через формообразующую головку, установленную последовательно на одной линии с пропиточной.



Рис. 4.2. Опытно-промышленная пултрузионная установка на предприятии компании Hanwha L&C Ltd. Co (Республика Корея)

К основным параметрам данного процесса относятся температура (на различных стадиях), давление в профилирующей головке, скорость и усилие протягивания. Консолидация стренг или лент и формообразование изделия осуществляются без

дополнительного нагрева материала. За счет этого снижаются затраты энергии, увеличивается производительность. Стадии процесса – пропитка, консолидация и формообразование – должны быть согласованы по основным параметрам (температуре, скорости и усилию) с учетом требований, предъявляемых к каждой из этих стадий.

Для консолидации термопластичных лент и стренг и образования профиля температура должна быть выше температуры плавления матричного полимера. После того как консолидация и формообразование профиля завершены, температура должна быть снижена до значений, при которых изделие сохраняет форму и приобретает прочность, достаточную для перемещения без повреждений в тянущем устройстве.

Усилие протягивания определяется в результате сложения усилий сопротивления протягиванию волокнистого наполнителя в пропиточной головке, сопротивления в направляющих устройствах и сопротивления профилирующей головки. В случае степенного закона течения полимерного расплава зависимость между усилием F и скоростью пултрузии u на различных стадиях процесса представлена в виде степенной функции:

$$F = k_F(\mu, u)u^n, \quad (4.1)$$

где $k_F(\mu, u)$ – коэффициент, зависящий от характера течения расплава на данной стадии процесса, вязкости расплава и определяющих ее условий теплопередачи, включая скорость перемещения u .

Зависимость между натяжением однонаправленного слоя волокон при пропитке расплавом на криволинейных отклоняющих элементах и скоростью перемещения слоя задается уравнением (2.19), а условие существования в зазоре между слоем и отклоняющим элементом прослойки полимера требуемой толщины – уравнением (2.18). Эти соотношения определяют граничные значения натяжения и скорости перемещения пучка волокон, при которых обеспечивается полная пропитка.

Связь между натяжением и скоростью протягивания, обеспечивающими консолидацию стренг или лент под давлением, создаваемым на криволинейной поверхности профилирующей головки усилием натяжения, задается уравнением

$$F_c(u) = \mu(T, u)R^{1-n}\varphi^{-n}B\left[K_c^*u\right]^n, \quad (4.2)$$

где R – радиус кривизны формообразующей поверхности; φ – угол контакта; B – ширина консолидируемого слоя; K_c^* – критерий консолидации, значение которого зависит от задаваемой степени консолидации c^* .

При протягивании натянутых стренг в контакте с криволинейной формообразующей поверхностью происходит фильтрация полимерного расплава через пучки волокон. Это служит причиной смещения армирующих волокон в трансверсальной плоскости, изменения статического момента сечения и жесткости при изгибе, последующего изменения кривизны стержней при охлаждении. Смещение нейтральной оси сечения Δu не должно превышать некоторого допустимого значения (рис. 4.3).

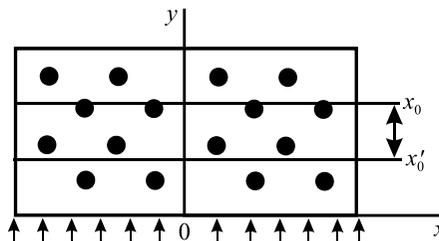


Рис. 4.3. Смещение нейтральной оси поперечного сечения

Зависимость смещения нейтральной оси сечения от натяжения и скорости протягивания профиля определяется уравнением

$$F(u) = \mu(T, u)R^{1-n}A_0\left[\frac{u\Delta y}{K_e\varphi}\right]^n, \quad (4.3)$$

где R – радиус формообразующей поверхности; A_0 – площадь сечения ленты или профиля; K_e – эффективный коэффициент проницаемости слоя; φ – угол обхвата.

Соотношения между усилиями и скоростями пултрузии для каждой комбинации компонентов и для каждого конкретного варианта технологии задают «окно» процесса – систему линий в координатах $F - u$, которые ограничивают область параметров, соответствующих требованиям, предъявляемым к отдельным

его стадиям. Внутри «окна» обеспечивается удовлетворительное качество изделий по рассмотренным выше четырем критериям.

Границы режимов, при которых по исследуемой технологии могут быть получены профили удовлетворительного качества с поперечным сечением 25×4 мм из полиамида-6 и полипропилена, армированных стеклоровингом (30% мас.), показаны на рис. 4.4.

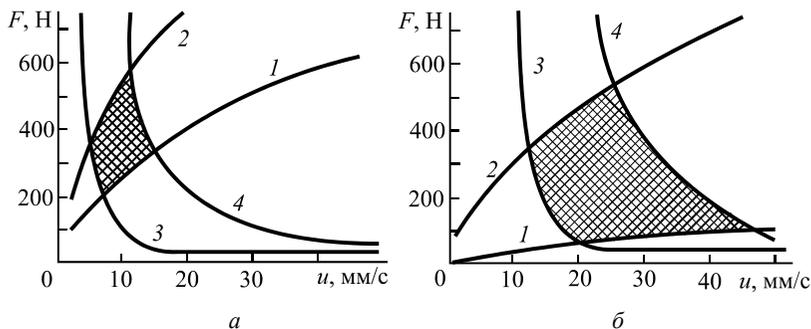


Рис. 4.4. Границы параметров пултрузии профилей из стеклоармированного полиамида-6 (а) и полипропилена (б) по критериям:

- 1 – пропитки; 2 – образования достаточной прослойки полимера;
 - 3 – консолидации; 4 – смещения наполнителя
- (заштрихована область допустимых значений [1])

Производительность процесса как масса изделия, формируемого в единицу времени, равна $Q = \rho A_0 u$. Отсюда следует, что максимальной производительности соответствует точка максимума скорости в области допустимых значений $F - u$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы. Для изучения процесса пултрузии используют гранулированный термопластичный полимер (полиамид-6, полипропилен, полиэтилентерефталат) с ПТР не менее 20 г/10 мин и стеклоровинг с линейной плотностью 2400 текс и диаметром элементарного волокна 13 или 20 мкм.

Оборудование. Процесс пултрузии исследуют на экспериментальной пултрузионной установке, описанной в лабораторной работе № 2.1.

Порядок выполнения

Предварительно устанавливают по зонам экструдера и пропиточной головки температуры согласно табл. 2.1 (см. лабораторную работу № 2.1) После прогрева до требуемой температуры стеклоровинг с линейной плотностью 2400 текс и со средним диаметром волокон 13–20 мкм протягивают с помощью специального щупа через пропиточную головку. Устанавливают комплект калибрующих втулок для получения степени наполнения 30% мас. Далее ровинг через формующее устройство заправляют в тянущее устройство.

Засыпают в дозирующее устройство экструдера ЧП 32×25 предварительно просушенные гранулы полимера. Включают вращение шнека экструдера, дозирующее и тянущее устройства.

Подбирают скорость протягивания из условия формирования качественного профиля прямоугольного сечения с размерами 25×4 мм. После выхода на режим с помощью бесконтактного термометра измеряют температуру на характерных участках – на выходе стренги из пропиточной головки, входе в формующее устройство и выходе из него, а также на входе в тянущее устройство.

Строят график изменения температуры по длине линии. Сравнивают экспериментальные значения с результатами расчета по формулам, приведенным в лабораторной работе № 1.1.

Измеряют скорость и усилие протягивания. Определяют, лежит ли полученная точка в области допустимых параметров «окна» процесса (см. рис. 4.4).

Содержание отчета

Отчет должен включать название и цель работы, краткое описание сущности процесса пултрузии, схему пултрузионной установки, сведения об используемых материалах, описание процесса подготовки установки и выхода на режим, режимы процесса получения профильного изделия, график изменения температуры по длине установки, сравнение экспериментальных значений с результатами расчета.

Лабораторная работа № 4.2

НАМОТКА НИТЬЮ

Цель работы – ознакомиться с технологией процесса намотки нитью осесимметричных изделий из волокнистых композитов с термореактивным связующим, изучить методы определения основных геометрических параметров процесса.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Намотка – процесс получения изделий из композиционных материалов (КМ) с непрерывным волокнистым наполнителем путем последовательного нанесения материала на формообразующую поверхность с помощью вращательного движения.

Методом намотки получают преимущественно осесимметричные изделия (тела вращения), однако при некоторых условиях могут быть намотаны изделия, отличающиеся от тел вращения, имеющие, например, прямоугольное сечение, искривленную ось, пересекающиеся оси-тройники и т. п. Форма наматываемого изделия обеспечивается геометрией формообразующей поверхности оправки или заготовки, используемой в качестве оправки, и заданной схемой укладки материала.

Наполнителями КМ для намотки изделий служат нити, ровинг, ленты, ткани, полотна, холсты, другие непрерывные или рулонные волокнистые материалы. В качестве связующих используют преимущественно термореактивные смолы (эпоксидные, полиэфирные и др.). К перспективным процессам относится намотка КМ с термопластичными матрицами.

Термореактивные связующие чаще всего наносят на волокнистые наполнители в жидком состоянии непосредственно перед намоткой («мокрая» намотка), реже используют предварительно пропитанные связующим материалы – препреги («сухая» намотка).

Намотка нитью выполняется на станках, основными элементами конструкции которых являются укладчик, приводы укладчика и (или) оправки (рис. 4.5). Для размещения и подачи волокнистого наполнителя или препрега имеется подающее устройство с

задатчиками и измерителями натяжения. При «мокрой» намотке станок дополнительно оснащают пропиточным устройством.

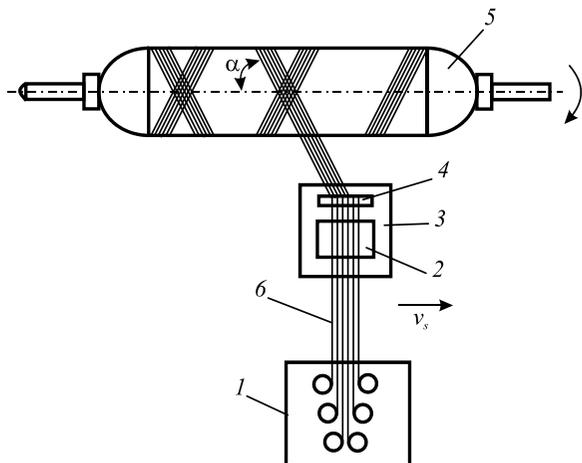


Рис. 4.5. Схема «мокрой» намотки нитей на вращающуюся оправку:

- 1 – шпулярник; 2 – пропиточное устройство; 3 – суппорт;
4 – направляющая гребенка; 5 – оправка; 6 – нити

Законы движения оправки и укладчика существенно образом определяют структуру материала в изделии. В зависимости от формируемой структуры различают виды намотки [13, 14]:

- прямую (окружную, или круговую) – лента или рулонный материал уложены по окружности;
- локсодромическую – нить, лента на поверхности вращения пересекают все меридианы под одним и тем же углом;
- продольную – нить, лента уложены в плоскости, проходящей через ось вращения;
- планарную – нить, лента лежат в плоскости, пересекающей формообразующую поверхность;
- спиральную – нить, лента уложены по винтовой линии;
- полярную – нить, лента проходят по касательной к полярному отверстию в изделии;
- продольно-поперечную (продольно-кольцевую) – одна из систем нитей (лент) уложена продольно, а другая – по окружности или винтовой линии с малым углом подъема;

– комбинированную, в которой сочетаются признаки указанных выше видов.

Возможности реализации различных схем укладки материала и управления ими в процессе намотки зависят от способов перемещения и числа степеней свободы укладчика и оправки.

Наибольшее распространение получил вариант, по которому материал наматывают на вращающуюся (или одновременно поступательно перемещающуюся) оправку (рис. 4.5). Значительно реже материал наносят на неподвижную оправку, при этом укладчик вращают и перемещают поступательно.

К основным параметрам процесса намотки относятся те, которые характеризуют схему укладки, тепловые и силоскоростные режимы. В случае «мокрой» намотки к основным параметрам процесса относятся также параметры пропитки волокнистого наполнителя жидким связующим.

Геометрические параметры – траектории, углы укладки, соотношения слоев нитей или лент – определяют структуру материала в изделии, поэтому их рассчитывают на стадии проектирования изделия. В то же время эти параметры не могут быть установлены вне связи с технологией намотки. Одним из наиболее существенных технологических ограничений при намотке лентой служит допустимое отклонение траектории укладки от геодезической линии.

Геодезической называют такую кривую линию на поверхности, главная нормаль которой совпадает с нормалью к поверхности. Для круглого цилиндра, например, геодезическими являются винтовые линии. По геодезической располагается на выпуклой поверхности натянутая гибкая нить при отсутствии трения.

Геодезическая линия на поверхности вращения радиусом r , проходящая в точке B под углом α к меридиану (рис. 4.6), задается уравнением Клеро:

$$r \sin \alpha = a, \quad (4.4)$$

где $a = \text{const}$ (константа Клеро).

Прямая задача проектирования процесса намотки состоит в том, чтобы при заданном напряженном состоянии изделия построить профиль формообразующей поверхности оправки, обеспечивающий геодезическую намотку. Ее решают, основываясь на уравнении геодезической линии (4.4), уравнениях, задающих главные радиусы кривизны поверхности, и уравнениях равновесия системы лент [14].

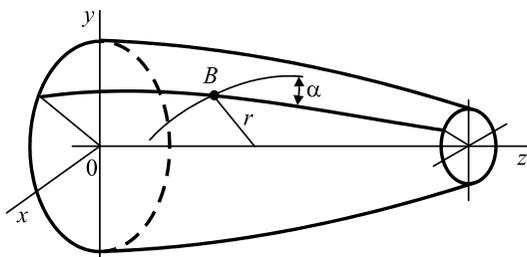


Рис. 4.6. Параметры нити, укладываемой на поверхность тела вращения

Обратная задача проектирования процесса намотки состоит в определении параметров движения укладчика и оправки для получения изделия с заданной геометрией.

В отдельных случаях отклонения от геодезической линии неизбежны. Например, при спиральной намотке трубы после укладки каждого слоя необходимо изменять направление перемещения укладчика на противоположное (реверсировать). Аналогичная ситуация возникает при спиральной намотке сосуда давления с полюсными отверстиями различного диаметра, при укладке ленты на коническую поверхность.

Намотка с отклонением от геодезической линии возможна, если при контакте ленты с формообразующей поверхностью возникают силы трения.

Сопротивление перемещению ленты, содержащей волокнистый наполнитель и полимерное связующее, относительно поверхности оправки или поверхности, образованной ранее уложенными лентами, имеет довольно сложные закономерности, поскольку возникающие в областях контакта силы связаны как с механическим, так и с молекулярным (адгезионным и когезионным) взаимодействием контактирующих поверхностей, т. е. зависят от структуры и состава ленты, вязких свойств матрицы и других факторов. Для технологических расчетов используют значения коэффициента трения, найденные экспериментально на основе известного закона Амонтона – Кулона для сухого трения: $F_T = f_T N$.

Коэффициент сухого трения о стальную поверхность расшлифованной стеклянной нити равен 0,6–0,7; нити с парафиновым замасливателем – 0,26; нити, пропитанной эпоксидным связующим, – 0,48 [1]. Для экспериментального определения коэффициента

трения предпочтительны методы, воспроизводящие условия равновесия ленты на формообразующей поверхности.

Соотношение, задающее траекторию точки контакта нити с формообразующей поверхностью при намотке с постоянным отклонением θ , имеет вид [1]

$$z = \frac{R}{\operatorname{tg}\theta} (\sin^{-1} \alpha_0 - \sin^{-1} \alpha). \quad (4.5)$$

Данное соотношение позволяет вычислить минимальную длину участка z_0 (участка реверсирования) и угол поворота оправки φ_0 , соответствующие изменению угла намотки от α_0 до $\pi / 2$ (рис. 4.7).

$$z_0 = \frac{R(\sin^{-1} \alpha_0 - 1)}{f_T}; \quad \varphi_0 = f_T^{-1} \ln \frac{\operatorname{tg}^{-1} \alpha_0}{2}. \quad (4.6)$$

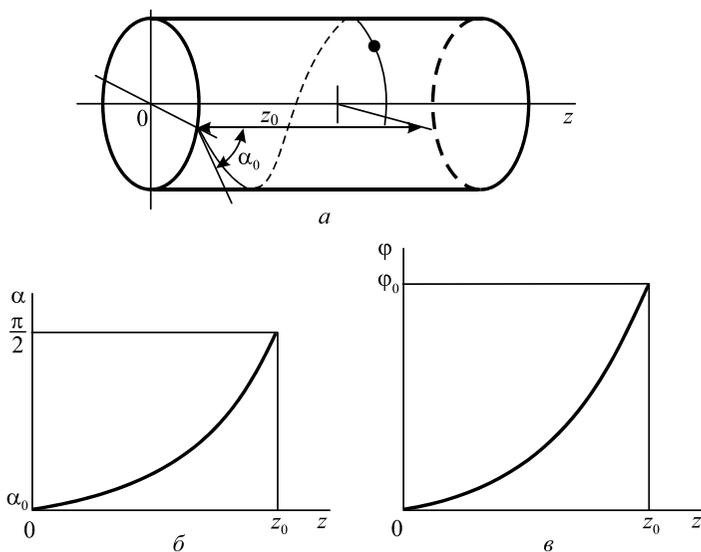


Рис. 4.7. Схема реверсирования нити (а), закон изменения угла намотки (б) и координат точки контакта (в) при укладке на цилиндрическую поверхность

При намотке ленты на коническую оправку угол намотки α связан с углом конусности λ и коэффициентом трения f_T . В пре-

дельном случае $f_T \sin \alpha_0 = \operatorname{tg} \lambda$. Это соотношение используют для определения коэффициента трения.

Геометрические соотношения, определяющие схему укладки, обеспечиваются кинематикой намоточного станка. Для спиральной укладки ленты под углом α должно выполняться следующее соотношение скоростей оправки и укладчика: $\operatorname{tg} \alpha = v_0 / v_z$, где v_0 – окружная скорость формообразующей поверхности ($v_0 = \omega R$, где ω – угловая скорость вращения оправки); v_z – осевая составляющая скорости укладчика.

Скорость укладки ленты равна $v = \sqrt{v_0^2 + v_z^2}$. Она ограничена условиями пропитки наполнителя термореактивным связующим и формообразования изделия. При «мокрой» намотке нитей с термореактивным связующим скорость укладки составляет обычно 0,5–1,5 м/с. Меньшие значения соответствуют намотке изделий с малыми диаметрами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы. Для изучения процесса намотки в качестве связующего используют полиэфирную смолу ПН-1 или эпоксидную смолу ЭД-20. В качестве армирующего наполнителя используют стеклоровинг с линейной плотностью 2400 текс и диаметром элементарного волокна 13 или 20 мкм.

Оборудование. Процесс намотки нитью исследуют на экспериментальном намоточном устройстве, описанном в лабораторной работе № 2.1 (см. рис. 2.6).

Порядок выполнения

1. Определение коэффициента трения нити о формообразующую поверхность. Стекланный ровинг заправляют в пропиточное устройство (рис. 2.6). Устанавливают с помощью тормозного устройства усилие натяжения 10 Н (его измеряют динамометром или специальным измерителем натяжения, предварительно проградуированным). Отклонение усилия натяжения от заданного не должно превышать ± 2 Н.

Заливают в пропиточную ванну связующее (эпоксидную или полиэфирную смолу). В ходе процесса контролируют уровень связующего в ванне. При необходимости связующее доливают.

Ровинг, пропитанный жидким связующим, наматывают под заданным натяжением на цапфу конической оправки (рис. 4.8). Для фиксирования конца укладывают 3–5 витков.

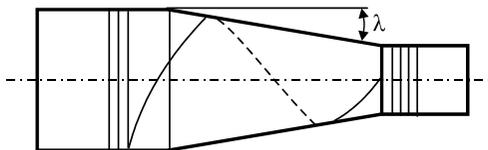


Рис. 4.8. Схема намотки нити на конусную поверхность

Отводят укладчик на расстояние, обеспечивающее укладку нити под углом $60\text{--}80^\circ$. Задают перемещение укладчика в направлении подъема конической поверхности и вращение оправки.

Наматывают нить на коническую поверхность и частично на цилиндрическую при предельно возможном (граничащем с соскальзыванием) угле намотки, закрепив после этого ленту окружной подмоткой трех–пяти витков. Накладывают на коническую поверхность оправки предварительно вырезанную из бумаги развертку (рис. 4.9) с нанесенными на нее следами образующих. Плотнo прижимают развертку к поверхности конуса и получают на ней отпечаток ленты.

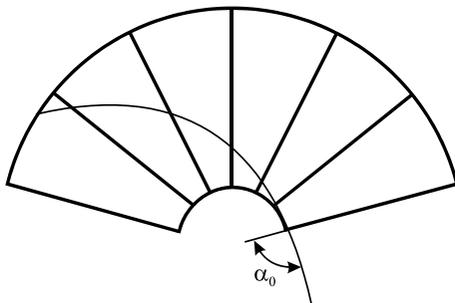


Рис. 4.9. Положение нити на развертке конической поверхности

Измеряют угол намотки ленты α в каждой точке пересечения ее со следами образующих на развертке.

Вычисляют коэффициент трения ленты о поверхность оправки по формуле

$$f_{\tau} = \frac{\operatorname{tg} \lambda}{\sin \alpha_0}, \quad (4.7)$$

где α_0 – угол намотки в начале конического участка.

Строят зависимость угла намотки от положения точки контакта ленты с формообразующей поверхностью.

Эксперимент повторяют при усилии натяжения нити 30 Н. Дают заключение о влиянии усилия натяжения на коэффициент трения.

2. Определение параметров участка реверсирования при намотке. Отводят укладчик на расстояние, обеспечивающее укладку нити под углом $50\text{--}60^\circ$. На цилиндрическую поверхность оправки укладывают 2–3 витка нити и изменяют направление движения укладчика на противоположное (рис. 4.7, а). Измеряют длину участка реверсирования z_0 и соответствующий ему угол поворота оправки φ_0 .

По значениям коэффициента трения, найденным в ходе выполнения задания 1, с помощью формул (4.6) рассчитывают длину участка реверсирования и угол поворота оправки. Сравнивают результаты расчета с результатами эксперимента.

Содержание отчета

Отчет должен включать название и цель работы, сведения об используемых материалах, схему процесса намотки нитью и краткое описание используемого оборудования, режимы процесса, краткое описание методик определения коэффициента трения нити о поверхность оправки и параметров участка реверсирования, результаты определения коэффициента трения и параметров участка реверсирования.

Лабораторная работа № 4.3

НАМОТКА АРМИРОВАННОЙ ТЕРМОПЛАСТИЧНОЙ ЛЕНТОЙ

Цель работы – ознакомиться с технологией процесса намотки армированной термопластичной лентой осесимметричных изделий.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Намотка лентой, содержащей волокнистый наполнитель и термопластичный матричный полимер, имеет свои особенности, обусловленные, в первую очередь, отличиями реологических свойств матричного полимера и необходимостью нагрева его для перевода в вязкотекучее состояние на стадиях формообразования и консолидации.

Возможны два варианта технологии – двухстадийный и одностадийный, соответствующие вариантам «сухой» и «мокрой» намотки, изложенным в лабораторной работе № 4.2.

По одностадийной технологии на оправку наматывают ленту, получаемую в результате совмещения волокнистого наполнителя и полимерного расплава на той же технологической установке («*on-line*» – «в линии») непосредственно перед намоткой, при этом дополнительный нагрев для консолидации материала не требуется. За счет этого уменьшается деструктурирующее тепловое воздействие на полимер, снижаются энергозатраты и стоимость технологического оснащения, повышается производительность процесса и снижается себестоимость изделий [1].

По двухстадийному варианту термопластичный матричный полимер сначала совмещают с волокнистым наполнителем по порошковой, волоконной или расплавной технологии, получают одностороннюю ленту, которую затем наматывают на оправку, нагревая до температуры плавления матричного полимера и соединяя с ранее нанесенными слоями. Нагрев и консолидацию лент осуществляют непосредственно в ходе укладки («*in-situ*» – «по месту»).

При намотке по двухстадийной технологии необходим нагрев ленты для перевода матричного полимера в вязкотекучее состояние и последующей консолидации композита. Нагрев осуществляют различными способами [15]:

- горячей газовой струей;
- инфракрасными лучами;
- лазерным излучением;
- газопламенной струей;
- возбуждением микроволновых колебаний;
- возбуждением ультразвуковых колебаний;
- контактным взаимодействием.

Нагрев – наиболее энергоемкая часть процесса намотки изделий термопластичной лентой, поэтому затраты тепловой энергии,

отнесенные к единице площади или длины соединяемого участка, должны быть минимальными.

Схема намотки термопластичной лентой по одному из наиболее распространенных вариантов показана на рис. 4.10.

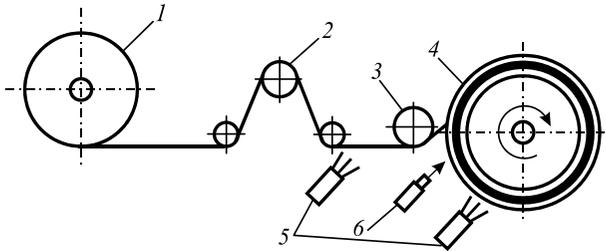


Рис. 4.10. Схема намотки термопластичной ленты с нагревом газовой горелкой:
1 – рулон с лентой; 2 – натяжной ролик; 3 – прикатывающий ролик;
4 – оправка; 5 – газовая горелка; 6 – термометр [1]

При нагреве лент горячим воздухом (в термокамере с электронагревателями) или с помощью ИК-излучателей поле температуры однородно, что позволяет повысить качество материала. С этой же целью оправку подогревают до температуры выше температуры стеклования матричного полимера. Однако при этом затраты энергии намного больше, чем при местном нагреве одного только консолидируемого участка поверхности и непосредственно перед приведением его в контакт с ранее уложенным слоем.

Для локального нагрева с высокой скоростью более пригодны высокоэнергетические источники – струя газовой горелки и лазерное излучение, обеспечивающие наибольшую производительность процесса при наименьших затратах энергии. В то же время при использовании высокоэнергетических источников тепла возрастает опасность термоокислительной деструкции матричного полимера, поэтому тепловое воздействие должно быть строго контролируемым. Другой недостаток таких источников – неоднородное поле температуры на поверхности.

Отличие намотки термопластичной ленты от намотки КМ с термореактивной полимерной матрицей обусловлено спецификой поведения термопластов при тепловом воздействии, в первую очередь высокой вязкостью полимерных расплавов. С одной стороны, для консолидации материала целесообразно иметь более низкую

вязкость, но с другой – снижение вязкости ведет к повышенным деформациям укладываемого слоя под действием натяжения ленты. Вязкое течение матричного полимера и ленты является важнейшим фактором стадий формообразования и консолидации при намотке. Влияние данного фактора на напряженное состояние в наматываемой ленте и на толщину получаемого слоя хорошо изучено [1, 16].

Прочность связи между слоями характеризуется безразмерным комплексом K_c основных параметров процесса – давления p , скорости намотки v и температуры T :

$$K_c = \frac{1}{v} \int_0^{x^*} \frac{p^s(x) dx}{\mu^s(T, x)}, \quad (4.8)$$

где x^* – длина участка, на котором температура поверхности превышает температуру плавления матричного полимера.

Для получения прочной связи между слоями при намотке лентой с термопластичным матричным полимером необходимо, чтобы удовлетворялось условие $K_c \geq K_c^*$, где K_c^* – допустимое значение, определяемое для данного материала из эксперимента или рассчитываемое на основе перколяционной теории консолидации [1].

Экспериментально прочность связи между слоями может быть оценена по усилию отслаивания ленты при испытаниях по схеме, показанной на рис. 4.11 или по прочности при изгибе (см. рис. 2.5, лабораторная работа № 2.1).

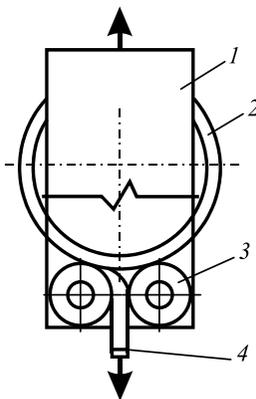


Рис. 4.11. Схема испытаний на отслаивание ленты:

1 – захват; 2 – кольцевой образец;

3 – упорный ролик; 4 – лента

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы. Для изучения процесса намотки используют однопослойно армированную ленту на основе стеклоровинга с линейной плотностью 2400 текс и термопластичного связующего (полиэтилена, полипропилена, полиамида). Ширина ленты 8–60 мм, степень наполнения 20–40% мас.

Оборудование. Процесс намотки армированной термопластичной ленты изучают на универсальном намоточном устройстве, показанном на рис. 4.12.

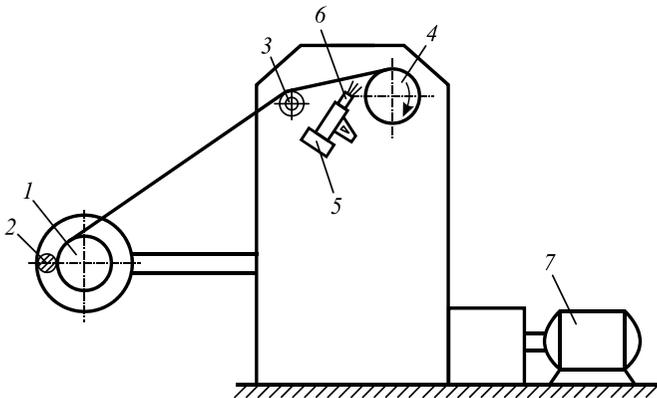


Рис. 4.12. Схема универсального устройства для намотки термопластичной ленты:

1 – шпулярник; 2 – тормозное устройство; 3 – укладчик;
4 – оправка; 5 – источник нагрева; 6 – насадка; 7 – электропривод

Устройство включает шпулярник 1 с установленной паковкой термопластичной ленты. Усилие натяжения ленты регулируется с помощью фрикционного тормозного устройства 2. С паковки лента через укладчик 3 поступает на оправку 4. Перевод термопластичного полимера в вязкотекучее состояние осуществляется с помощью источника нагрева 5.

В качестве источника нагрева используют термовоздуходувку BOSH GHG 660 LCD с регулируемой температурой воздуха и скоростью потока. Допускается использование других источников нагрева (газовой горелки, ИК-нагревателя и др.), обеспечивающих плавление матричного полимера при заданных параметрах процесса

намотки. В зависимости от ширины ленты могут применяться различные насадки *b* на термовоздуходувку.

Вращение оправки осуществляется при помощи электропривода *7* со встроенным регулятором частоты.

Порядок выполнения

Термопластичную ленту закрепляют на оправке намоточного устройства. Устанавливают с помощью тормозного устройства усилие натяжения 20 Н (его измеряют динамометром или специальным измерителем натяжения, предварительно проградуированным). Отклонение усилия натяжения от заданного не должно превышать ± 5 Н. На термовоздуходувке устанавливают температуру воздушного потока 400°C и скорость потока 70–80% от максимальной. Варьируя скорость намотки (не меньше трех значений, отличающихся друг от друга не менее чем на 50% и обуславливающих удовлетворительную консолидацию лент), наматывают по два кольца для каждого значения скорости. Количество слоев 5–8. Процесс повторить при температуре воздушного потока 500 и 600°C .

Измеряют с помощью штангенциркуля размеры полученных колец с точностью до 0,1 мм. Одно из колец для каждого режима намотки разрезают на сегменты для испытаний на изгиб по методике, изложенной в лабораторной работе № 2.1. Испытания проводят на испытательной машине Р-0,5. По формуле (2.21) рассчитывают прочность при сдвиге. Строят зависимость прочности при сдвиге от параметров процесса намотки (скорости вращения оправки и температуры воздушного потока).

Для второго кольца определяют прочность связи между лентами по методу отслаивания (рис. 4.11). От кольца отслаивают ленту на участке длиной 80–100 мм. Устанавливают кольцо в приспособление и закрепляют отслоенный участок ленты в верхнем захвате машины Р-0,5. Включают нагрузку и фиксируют усилие $F_{\text{отс}}$, при котором происходит отслаивание. Рассчитывают удельное усилие отслаивания:

$$F_{\text{уд}} = \frac{F_{\text{отс}}}{b}, \quad (4.9)$$

где b – ширина кольца.

Строят зависимости удельного усилия отслаивания от параметров процесса намотки (скорости вращения оправки и темпера-

туры воздушного потока). Для каждого из режимов определяют степень консолидации:

$$c = \frac{F_{уд}}{F_{уд}^*}, \quad (4.10)$$

где $F_{уд}^*$ – максимальное удельное усилие отслаивания из всех режимов процесса намотки.

Строят зависимость степени консолидации от параметров процесса намотки (скорости вращения оправки и температуры воздушного потока). Делают выводы о влиянии параметров процесса намотки на степень консолидации.

Содержание отчета

Отчет должен включать название и цель работы, сведения об используемых материалах, схему процесса намотки и краткое описание используемого оборудования, режимы процесса, краткое описание методик определения прочности связи между слоями, зависимости прочности связи и степени консолидации от варьируемых параметров процесса намотки, выводы о влиянии параметров процесса намотки на степень консолидации.

Лабораторная работа № 4.4

ПЛАСТ-ФОРМОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НАПОЛНЕННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ

Цель работы – ознакомиться с технологией процесса пластформования.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Прессование изделий из термопластов осуществляют следующими методами: без предварительного нагрева (ударное прессование порошков, объемная штамповка листовых материалов), с нагревом материала непосредственно в форме (прямое прессование), с предварительным нагревом заготовок вне формы с предварительной пластикацией загружаемой дозы в червячных экструдерах [1, 17].

Прессование предварительно пластицированной заготовки (пласт-формование) включает пластикацию термопластичных композиций в червячном экструдере, накопление дозы, формирование заготовки и прессование из нее изделия.

В комплект оборудования для изготовления изделий по этому методу входят червячный экструдер в качестве пластикатора, пресс, средства формирования заготовки и ее перемещения в пресс-форму.

Заготовки получают путем отделения от непрерывной полосы пластицированной композиции (экструдата), выдавливаемой через плоскощелевую головку, отрезков заданной длины (например, гильотинными ножницами) или путем выдавливания через отверстие накопителя дозы заданного объема. Сервогидравлический привод запирающего устройства позволяет с высокой точностью регулировать толщину и длину заготовки.

Накопители выполняют в виде цилиндра с поршнем, кольцевой или плоскощелевой камеры и снабжают средствами регулирования объема дозы, выдавливания пластицированной композиции и регулирования размеров заготовки.

Заготовки перемещают от пластикатора к прессу с помощью транспортеров, оснащенных роликами или проволочными лентами. Чтобы исключить прилипание заготовки, ролики или проволоку покрывают антиадгезионными составами. Для поддержания температуры заготовки на участке перемещения от экструдера к прессу транспортер размещают внутри термоизолированного или нагреваемого канала. В пресс-форму заготовки подают вручную или при помощи роботов-манипуляторов с вилочными (игольчатыми) захватами.

Процесс получения изделий включает дозирование компонентов и пластикацию полимера в экструдере; формирование полосы и заготовки, непрерывно или из предварительно накопленной дозы, необходимой для изготовления изделия; формирование и укладку заготовки в форму; формообразование и охлаждение изделия в форме (под прессом); извлечение изделия.

Основные параметры процесса: масса и размеры заготовки, температура заготовки и формы, усилие прессования и скорость деформирования заготовки, продолжительность выдержки под давлением (охлаждения в форме).

Плотность композиции, получаемой в экструдере под давлением, практически совпадает с плотностью материала в изде-

лии, поэтому достаточно задать объем заготовки по размерам разрезаемой полосы или по объему камеры накопителя, устанавливая положение ограничивающих или выталкивающих элементов.

Температуру заготовки задают из условия пластикации с учетом ограничений по термоокислительной деструкции матричного полимера. При максимально допустимой температуре снижается усилие формообразования, улучшаются условия пластикации и консолидации материала, уменьшается продолжительность заполнения формы, но увеличивается продолжительность охлаждения изделия в форме. Уменьшить продолжительность охлаждения изделия можно, снизив температуру формообразующих поверхностей, однако при этом требуется более высокое усилие для формообразования изделия, ухудшается качество поверхности изделия. Указанные обстоятельства имеют решающее значение при определении оптимальной температуры заготовки и пресс-формы. Обычно температуру заготовки принимают на 10–20°С ниже температуры начала термоокислительной деструкции, а температуру пресс-формы – из условия получения поверхности удовлетворительного качества.

При задании усилия, необходимого для формообразования изделия, наибольшая трудность заключается в определении граничных условий и вязкопластических свойств композиции, зависящих от ее состава.

Для приближенной оценки продолжительности смыкания формы и усилия прессования плоских изделий можно воспользоваться соотношениями для случая деформирования диска между плоскопараллельными плитами [1]. Введем приведенный радиус $R_{\text{пр}}$ изделия как радиус окружности, описанной около развертки изделия, т. е. расстояние от центра тяжести до наиболее удаленной точки развертки (рис. 4.13).

Усилие, необходимое для деформирования заготовки в диск радиусом $R_{\text{пр}}$ и толщиной h , может быть вычислено по конечному (квазиравновесному) состоянию на основе модели композиции как пластичного тела с пределом текучести по критерию Треска – Сен-Венана и трением на поверхности [1]:

$$F = 2k_F \tau_0 A \left[1 + \frac{f_T}{3} \frac{R_{\text{пр}}}{h} \right], \quad (4.11)$$

где k_F – коэффициент запаса усилия, учитывающий неоднородность материала и возможные отклонения условий формообразования от номинальных; τ_0 – предел текучести композиции; f_T – коэффициент трения о формообразующую поверхность.

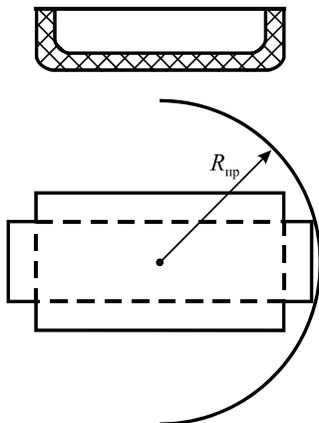


Рис. 4.13. Схема определения приведенного радиуса заготовки

Если толщина изделия мала по сравнению с приведенным радиусом, то второе слагаемое в скобке правой части формулы (4.11) мало по сравнению с единицей. Тогда из этой формулы вытекает приближенная оценка среднего давления $\bar{p} = F/A$ и относительной толщины изделия, которая может быть получена при этом давлении:

$$\frac{h}{R_{\text{пр}}} = \frac{2k_F \tau_0 f_T}{3\bar{p}}. \quad (4.12)$$

Время t_ϕ формообразования заготовки, имеющей исходную толщину h_0 , до конечной толщины h равно [1]

$$t_\phi = 2,5nB^{-s} \left(h^{-2,5s} - h_0^{-2,5s} \right), \quad (4.13)$$

где n – показатель степени в законе течения композиции при температуре формования; $B = F / \left(2\pi f_T \mu R_{\text{пр}}^3 \right) \sqrt{\left(1 - f_T^2 \right)^n / \left(3^{n-2} h^3 \right)}$ (здесь μ – коэффициент консистенции); $s = 1/n$.

Продолжительность охлаждения плоского изделия, формируемого между плитами [1],

$$t_{\text{охл}} = \frac{h^2}{\pi^2 a_T} \ln \left[\frac{4 T_{\text{ф}} - T_1}{\pi T_{\text{ф}} - T_2} \right], \quad (4.14)$$

где a_T – коэффициент температуропроводности композиции в направлении, перпендикулярном плоскости изделия; $T_{\text{ф}}$ – температура формы; T_1 и T_2 – начальная и конечная температура материала.

Время цикла $t_{\text{ц}}$ определяется суммой продолжительности формообразования, рассчитанной по формуле (4.13), и охлаждения (4.14), умноженной на коэффициент $k_{\text{ц}}$, учитывающий затраты времени на вспомогательные операции:

$$t_{\text{ц}} = k_{\text{ц}} (t_{\text{ф}} + t_{\text{охл}}). \quad (4.15)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы. Для изучения процесса пласт-формования используют гранулы ДЛМ (ДПМ) на основе стеклоровинга с линейной плотностью 2400 текс и термопластичного связующего (полиэтилена, полипропилена, полиамида). Длина гранул 8–12 мм, степень наполнения 20–40% мас.

Также допускается в качестве связующего использовать гранулированные термопластичные полимеры (полиэтилен, полипропилен, полиамид-6, полиэтилентерефталат, ПВХ и др.), их смеси, в том числе вторичные; в качестве наполнителя стеклянные, полимерные волокна, волокна растительного происхождения (лен, пенька и др.), древесные волокна и частицы различных фракций, в том числе отходы переработки древесины.

Оборудование. Экспериментальная установка для пласт-формования смонтирована на основе червячного экструдера ЧП 32×25 и гидравлического пресса П-50 (рис. 4.14).

Принцип работы установки следующий. В дозирующее устройство 1, установленное над загрузочным отверстием экструдера 2 подаются компоненты материала. В экструдере происходит разогрев материала, пластикация и гомогенизация. На выходе из него

установлен обогреваемый накопитель 3, снабженный гидроцилиндром 4 и заслонкой 5.

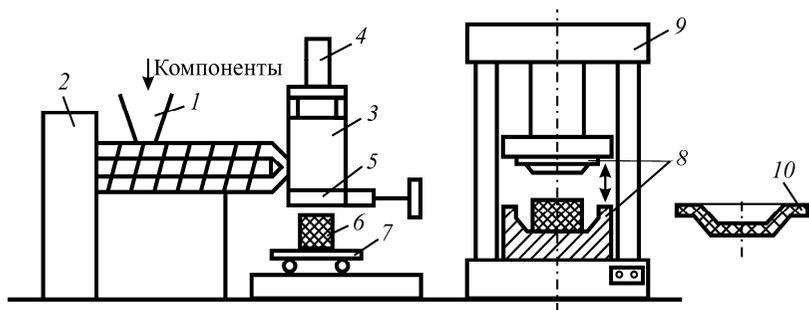


Рис. 4.14. Схема установки для пласт-формования:

- 1 – дозирующее устройство; 2 – экструдер; 3 – накопитель;
4 – гидроцилиндр; 5 – заслонка; 6 – заготовка; 7 – приемное устройство;
8 – пресс-форма; 9 – гидравлический пресс; 10 – изделие

Пластицированный материал из материального цилиндра экструдера подается в полость накопителя, где формируется заготовка требуемого объема. Необходимый объем заготовки регулируется положением поршня. После накопления материала вращение червяка экструдера останавливается, открывается заслонка 5 и гидроцилиндр выталкивает заготовку 6 в виде цилиндра из полости накопителя в приемное устройство 7. Далее заготовка помещается в открытую пресс-форму 8, установленную на гидравлический пресс 9, и прессуется. Отпрессованное изделие выдерживается под давлением для охлаждения до заданной температуры, форма раскрывается и готовое изделие 10 извлекается из нее.

Порядок выполнения

Измеряют размеры формообразующих поверхностей пресс-формы, установленной на гидравлический пресс. По размерам рассчитывают объем изделия $V_{и}$. Устанавливают поршень накопителя таким образом, чтобы объем заготовки был равен $(1,1-1,2)V_{и}$.

По схеме, показанной на рис. 4.13, определяют приведенный радиус. По формуле (4.11) рассчитывают усилие, необходимое для деформирования заготовки. По формулам (4.13)–(4.15) рассчитывают время цикла изготовления изделия.

В зависимости от материала устанавливают по зонам экструдера и накопителя температуру. Для гранул ДЛМ температуру выбирают согласно табл. 4.1.

Таблица 4.1

**Температурные режимы переработки гранул ДЛМ
по методу пласт-формования**

Матрица ДЛМ	Температура по зонам экструдера, °С			Температура накопителя, °С
	I	II	III	
Полиэтилен низкого давления (ПЭНД)	140 ± 5	180 ± 5	200 ± 5	200 ± 5
Полипропилен (ПП)	180 ± 5	220 ± 5	260 ± 5	260 ± 5
Полиамид-6	220 ± 5	260 ± 5	280 ± 5	280 ± 5

Предварительно просушенный и тщательно перемешанный материал загружают в бункер-дозатор экструдера. После прогрева экструдера и накопителя до требуемой температуры включают вращение шнека экструдера. Частота вращения 130–180 об./мин. С помощью секундомера фиксируют время накопления t_n заданного объема. Выдавливают заготовку из полости накопителя и перемещают в пресс-форму. Время от момента извлечения заготовки до момента начала прессования не должно превышать более чем 5–10 с. Включают гидравлический пресс и формируют изделие при усилнии формообразования, рассчитанном по формуле (4.11). Отформованное изделие выдерживают под давлением в течение времени, рассчитанного по формуле (4.14). Снимают давление и извлекают готовое изделие. Визуально оценивают его качество. При наличии недоливов увеличивают усилие прессования.

С помощью бесконтактного термометра измеряют температуру на поверхности изделия после извлечения. Сравнивают ее с температурой T_2 в формуле (4.14).

Изделие взвешивают с точностью до 1 г и определяют производительность экструдера:

$$G = \frac{m}{t_n}, \quad (4.16)$$

где m – масса изделия.

Сравнивают расчетные значения параметров процесса (время цикла и охлаждения, усилие формования) с экспериментальными.

Содержание отчета

Отчет должен включать название и цель работы, сведения об используемых материалах, чертеж изделия, схему процесса пластформования и описание используемого оборудования, расчет параметров процесса, сравнение рассчитанных и экспериментальных параметров процесса.

Лабораторная работа № 4.5

ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТЕКЛОПОЛНЕННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ

Цель работы – ознакомиться с технологией процесса литья под давлением изделий из термопластов, наполненных длинными стеклянными волокнами.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Литье под давлением – процесс формообразования изделий путем заполнения под давлением замкнутой и охлаждаемой (в случае переработки термопластичных полимеров) или нагреваемой (в случае переработки терморективных полимеров) формы дозой материала, нагретого до вязкотекучего состояния, с последующим отверждением термопластичных (в результате охлаждения) или терморективных (в результате полимеризации или поликонденсации) полимеров в форме. Это один из наиболее распространенных методов формообразования изделий из термопластов, в том числе наполненных волокнами. Его используют также для получения изделий из реактопластов и резиновых смесей, вспенивающихся термопластичных и терморективных пластмасс [1, 17].

Стеклонаполненные термопласты (СНТ) для переработки в изделия методом литья под давлением применяют в виде гранул.

В зависимости от длины волокон в гранулах различают коротковолокнистые (со средней длиной волокон до 1 мм) и длиноволокнистые (со средней длиной волокон более 5 мм) литьевые СНТ (см. лабораторную работу № 2.2).

Изделия из длиноволокнистых СНТ при одинаковом составе имеют более высокие механические свойства, чем изделия из коротковолокнистых СНТ, и, кроме того, длиноволокнистые СНТ оказывают меньшее абразивное воздействие на оборудование и формы в процессе переработки.

Процесс осуществляют на литьевых машинах (термопласт-автоматах), основными узлами которых являются инжекционный механизм и механизм замыкания. Наибольшее распространение получили литьевые машины с червячным инжекционным механизмом (рис. 4.15), в которых пластикация материала осуществляется за счет нагрева цилиндра и диссипации механической энергии, подводимой к червяку, а также трения и вязкого деформирования материала. Такие машины обеспечивают более быстрый (по сравнению с поршневыми) нагрев и более однородное поле температуры расплава, его лучшую гомогенизацию и большую точность дозирования [18, 19].



Рис. 4.15. Термопластавтомат KuASY 60/20

Основные параметры литьевых машин: диаметр и частота вращения червяка, определяющие производительность пластикации; давление и объем впрыска, усилие запираания формы, определяющие возможности формообразования изделий; расстояние между колоннами и плитами, определяющее допустимые размеры литьевой формы.

Литье под давлением термопластичных материалов включает следующие последовательно протекающие стадии: пластикацию гранулированного материала; заполнение формы расплавом; охлаждение материала и извлечение изделия.

При пластикации в червячном экструдере расплав накапливается в полости цилиндра между червяком и соплом. Объем накапливаемого в цилиндре расплава устанавливают равным объему отливки с поправкой на объем литниковых каналов. При литье изделий из длинноволокнистых стеклонаполненных термопластов объем отливки должен составлять 30–60% от номинального объема впрыска литьевой машины. Объем впрыска и диаметр червяка связаны условием накопления дозы в части цилиндра длиной $(2-3)D$.

Продолжительность накопления дозы расплава приближенно оценивают по пластикационной производительности машины Q :

$$t_{\text{пл}} = \frac{n_{\text{г}} V_1 \rho_{\text{р}}}{k_{\text{р}} Q}, \quad (4.17)$$

где $n_{\text{г}}$ – число гнезд в литьевой форме; V_1 – объем полости для одного изделия; $\rho_{\text{р}}$ – плотность расплава; $k_{\text{р}}$ – коэффициент, учитывающий вязкость расплава.

Перемещая червяк, расплав впрыскивают в форму через отверстие на выходе из цилиндра (сопло) и литниковую систему формы (рис. 4.16). Литниковая система формы включает, как правило, центральный литниковый канал 7, разводящие 8 и впускные 9 каналы (питатели). Их размеры должны обеспечивать заполнение формы при оптимальных скоростях и давлениях расплава.

Вязкое течение расплава в литниковой системе сопровождается диссипацией энергии, а в случае переработки длинноволокнистых стеклонаполненных термопластов – и разрушением волокон. Поэтому при литье под давлением длинноволокнистых стеклонаполненных термопластов обычно применяют литниковые системы с увеличенными размерами отверстий и устанавливают более низ-

кие значения давления и скорости впрыска, чем при переработке ненаполненных термопластов. Диаметр сопла от 4 до 6 мм, диаметр центрального литникового отверстия не менее 4 мм (предпочтительно 6 мм).

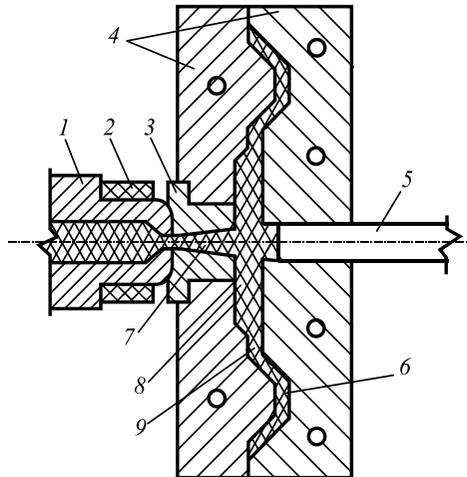


Рис. 4.16. Литниковая система:
 1 – сопло; 2 – нагреватель; 3 – литниковая втулка;
 4 – матрица; 5 – шпилька; 6 – формообразующая
 полость; 7 – центральный литниковый канал;
 8 – разводящий канал; 9 – впускной канал [18]

Давление на входе в литниковую систему считают равным отношению усилия впрыска $F_{вп}$ к площади сечения цилиндра $A_{ц}$:

$$p_{вп} = \frac{F_{вп}}{A_{ц}}. \quad (4.18)$$

Явления, происходящие в формообразующей полости формы, отражает график изменения давления – диаграмма цикла литья (рис. 4.17).

Время цикла определяют как сумму машинного t_m и технологического t_t времени:

$$t_{ц} = t_m + t_t. \quad (4.19)$$

В машинное время включают время смыкания и размыкания формы (определяют экспериментально или по паспортным данным

литевой машины) и время впрыска. Время впрыска определяют по объему отливки $V_0 = (1,1-1,2)n_r V_1$ и заданной скорости перемещения червяка v_q в процессе заполнения формы:

$$t_{\text{вп}} = \frac{V_0}{v_q}. \quad (4.20)$$

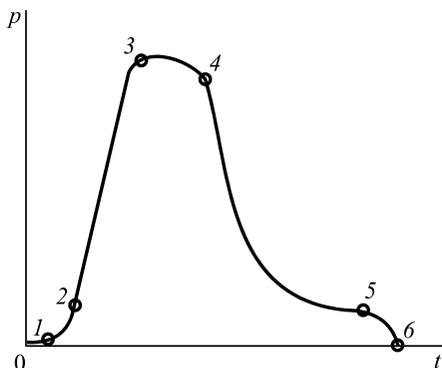


Рис. 4.17. Диаграмма цикла литья под давлением:

- 0–1 – замыкание формы и подвод сопла к литнику формы;
- 1–2 – впрыск расплава; 2–3 – уплотнение материала в форме;
- 3–4 – обратное течение расплава из формы (утечка);
- затвердевание литника; 4–5 – охлаждение изделия;
- 5–6 – разъем формы [1]

Технологическое время включает продолжительность охлаждения под давлением и продолжительность охлаждения изделия до заданной температуры отвердевания. Продолжительность охлаждения частично кристаллического термопласта под давлением принимают равной времени достижения во впускном канале температуры плавления. Для аморфных термопластов в качестве такой температуры иногда принимают температуру стеклования.

Основываясь на решении задачи теплопроводности для цилиндра и ограничиваясь только первым членом ряда, получаем продолжительность охлаждения (в секундах) [1]:

$$t_{\text{охл}} = 0,173 \left(\frac{R^2}{a_r} \right) \ln 1,6 \left(\frac{T_p - T_\Phi}{T_{\text{пл}} - T_\Phi} \right), \quad (4.21)$$

где R – радиус канала, мм; a_r – коэффициент температуропроводности материала, мм²/с; T_p – температура расплава, принимаемая равной температуре последней зоны цилиндра; T_ϕ – температура формы; $T_{пл}$ – температура плавления полимера.

Продолжительность выдержки термопластичных материалов без давления рассчитывают из условия охлаждения материала в форме до температуры плавления или стеклования (в зависимости от типа полимера). Также используют решение задачи теплопроводности, но уже для типичных элементов изделия. Например, продолжительность выдержки для охлаждения плоских элементов вычисляют по формуле (4.14).

Рекомендуемые режимы литья под давлением изделий из длинноволокнистых стеклонаполненных термопластов приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

**Режимы литья под давлением полимеров,
наполненных длинными стеклянными волокнами [1]**

Матрица	Температура, °С			Скорость впрыска, м/с	Частота вращения шнека, об./мин	Давление, МПа	
	зон ци- линдра	сопла	формы			впры- ска	выдер- жки
ПП	260–280	280	60	40–60	40–60	60–100	40–80
ПЭВД	240–270	270	60	40–60	40–60	60–100	40–80
ПЭТФ	260–270	275	150	40–60	30–50	60–100	40–80
ПА-6	280–300	290	90	40–70	40–70	80–100	60–80

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материал и образцы. Для литья используют ДЛМ на основе стеклоровинга с линейной плотностью 2400 текс и термопластичного связующего (полипропилена, полиэтилена, полиамида, полиэтилентерефталата). Длина гранул ДЛМ 8–12 мм, степень наполнения 20–40% мас.

Из ДЛМ отливают стандартные образцы для испытаний на растяжение («лопатки») по ГОСТ 11262–80 и образцы для определения усадки по ГОСТ 18616–73 (диски диаметром 80 или 100 мм).

Оборудование. Для изготовления образцов и ознакомления с процессом литья используют термопластавтомат KuASY 60/20 (см. рис. 4.15).

Допускается использовать литьевые машины других марок, обеспечивающие получение вышеуказанных изделий.

Порядок выполнения

Измеряют размеры формообразующих поверхностей формы с точностью до 0,01 мм. Рассчитывают объем формообразующей полости V_1 , на основании которого вычисляют объем отливки:

$$V_0 = 1,2n_f V_1.$$

Используя формулы (4.14), (4.19)–(4.21), определяют время цикла изготовления образцов в виде «лопаток» и дисков.

В зависимости от материала устанавливают на термопластавтомате режимы литья из табл. 4.2. Время выдержки под давлением и продолжительность охлаждения без давления задают согласно рассчитанным по формулам (4.21) и (4.14) соответственно. Предварительно просушенный материал помещают в загрузочный бункер литьевой машины.

Изготавливают не менее 5 образцов каждого типа. Визуально оценивают качество изготовленных образцов. С помощью штангенциркуля измеряют размеры образцов и проверяют их соответствие чертежам. При необходимости корректируют режимы литья.

Для образцов в виде дисков определяют усадку S , %:

$$S = \frac{100(D_1 - D)}{D_1}, \quad (4.22)$$

где D_1 – размер формы (диаметр формообразующей полости), мм;
 D – размер образца (диаметр), мм.

Содержание отчета

Отчет должен включать цель работы, краткое описание процесса литья под давлением, сведения об используемых материалах, режимах литья, результаты расчета режимов литья и измерения размеров образцов, оценку соответствия полученных изделий действующим стандартам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ставров, В. П. Формообразование изделий из композиционных материалов: учеб. пособие / В. П. Ставров. – Минск: БГТУ, 2006. – 482 с.
2. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 599 с.
3. Ставров, В. П. Механика композиционных материалов: учеб. пособие / В. П. Ставров. – Минск: БГТУ, 1996. – 164 с.
4. Мышкин, Н. К. Трибология. Принципы и приложения / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – 310 с.
5. Барсуков, В. Г. Технологическое трение при экструзии композитов / В. Г. Барсуков, А. И. Свириденко. – Гродно: ГрГУ, 1998. – 201 с.
6. Ромм, Е. С. Структурные модели порового пространства горных пород / Е. С. Ромм. – Л.: Недра, 1985. – 240 с.
7. Справочник по композиционным материалам: в 2 кн. / под ред. Дж. Любина. – М.: Машиностроение, 1988. – Кн. 1. – 448 с.
8. Тадмор, З. Теоретические основы переработки полимеров / З. Тадмор, К. Гогос; пер. с англ. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
9. Красовский, В. Н. Сборник примеров и задач по технологии переработки полимеров / В. Н. Красовский, А. М. Воскресенский. – Минск: Выш. шк., 1975. – 319 с.
10. Смирнов, Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / В. Н. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. – М.: Наука, 1965. – 512 с.
11. Thomason, J. L. Influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre-reinforced polypropylene. Part 3 / J. L. Thomason // Composites A. – 1996. – Vol. 27. – P. 1075–1084.
12. Advanced composites manufacturing / Ed. T. G. Gutowski. – N.-Y.: J. Wiley. – 1997. – 581 p.
13. Калинин, В. А. Намотанные стеклопластики / В. А. Калинин, М. С. Макаров. – М.: Химия, 1986. – 272 с.
14. Цыплаков, О. Г. Научные основы технологии композиционно-волоконистых материалов: в 2 ч. – М.: Химия, 1974. – Ч. 1. – 315 с.

15. Головкин, Г. С. Производство и переработка непрерывно армированных термопластов намоткой / Г. С. Головкин, Д. В. Павловский // Пластические массы. – 1997. – № 3. – С. 42–48.

16. Роль вязких свойств термопластичного препрега и матрицы при намотке колец / В. П. Ставров [и др.] // Механика композитных материалов. – 2000. – Т. 36, № 3. – С. 419–427.

17. Основы технологии переработки пластмасс: учеб. для вузов / С. В. Власов [и др.]. – М.: Химия, 2004. – 600 с.

18. Рэвяка, М. М. Разлік і канструяванне пластмасавых вырабаў і формаў: вучэб. дапам. / М. М. Рэвяка, В. М. Каспяровіч. – Мінск: БДТУ, 2002. – 357 с.

19. Ревяко, М. М. Оборудование и основы проектирования предприятий по переработке пластмасс / М. М. Ревяко, О. М. Касперович. – Минск: БГТУ, 2005. – 344 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ	4
Лабораторная работа № 1.1. Нагрев и охлаждение при формовании изделий	4
Лабораторная работа № 1.2. Определение показателя те- кучести расплава и параметров степенного закона течения в капилляре.....	14
Лабораторная работа № 1.3. Определение параметров сте- пенного закона течения полимерного расплава методом сжатия диска.....	21
Лабораторная работа № 1.4. Определение параметров зако- на течения высоконаполненной полимерной композиции.....	30
Лабораторная работа № 1.5. Определение коэффициента трения при скольжении полимерных композиций	36
Лабораторная работа № 1.6. Определение предела текуче- сти композиций.....	40
2. СОВМЕЩЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ	46
Лабораторная работа № 2.1. Пропитка стеклоровинга тер- морективными и термопластичными полимерными свя- зующими.....	46
Лабораторная работа № 2.2. Получение термопластичных стеклонаполненных литьевых и прессовочных композиций	62
Лабораторная работа № 2.3. Пластикация термопластич- ных композиций в червячном экструдере	70
3. КОНСОЛИДАЦИЯ МАТЕРИАЛА	75
Лабораторная работа № 3.1. Уплотнение волокнистых ма- териалов	75
Лабораторная работа № 3.2. Сплавление термопластичных стренг	81

4. ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ.....	86
Лабораторная работа № 4.1. Пултрузия профилей из армированных термопластов	86
Лабораторная работа № 4.2. Намотка нитью	92
Лабораторная работа № 4.3. Намотка армированной термопластичной лентой	99
Лабораторная работа № 4.4. Пласт-формование изделий из наполненных термопластов	105
Лабораторная работа № 4.5. Литье под давлением изделий из стеклонеполненных термопластов	112
ЛИТЕРАТУРА	119

Учебное издание

Карпович Олег Иосифович

**ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ
ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебно-методическое пособие

Редактор *Т. Е. Самсанович*

Компьютерная верстка *О. Ю. Шантарович*

Корректор *Т. Е. Самсанович*

Подписано в печать 07.05.2014. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 7,1. Уч.-изд. л. 7,3.

Тираж 50 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение:

УО «Белорусский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/227 от 20.03.2014.

ЛП № 02330/12 от 30.12.2013.

Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.