



УДК 621.921.8(043)

© *О. Ю. Еренков, Е. А. Мясников, 2008*

## **РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К РЕЗАНИЮ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ХИМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

*Еренков О. Ю.* – канд. техн. наук, доц., докторант кафедры «Литейное производство и технология металлов» (ТОГУ); *Мясников Е. А.* – канд. техн. наук, доц. кафедры «Высшая математика», (ХГАЭП)

Проведен анализ процессов и явлений при взаимодействии химической среды с полимерами и разработка на его основе химико-механического метода обработки резанием заготовок из полимерных материалов. Сущность способа заключается в направленном изменении свойств обрабатываемого материала, путем предварительной химической обработки поверхностного слоя, с целью снижения сопротивления разрушению поверхностного слоя заготовки в зоне резания при последующем взаимодействии его с режущим инструментом. Представлена методика расчета основных диффузионных параметров при взаимодействии твердых полимерных материалов с агрессивной средой.

Processes and phenomena occurring at the interaction of a chemical medium and polymers are analyzed and a chemo-mechanical method of polymer processing has been designed. The heart of the method is to change, in a required manner, properties of the material being processed by preliminary chemical processing of a surface layer in order to make subsequent machining with a cutting tool easier. The design methodology of major diffusion parameters with the interaction of solid polymers and an aggressive medium is provided.

Разрушение структуры конструкционных материалов, в частности полимерных, эффективно происходит при воздействии агрессивных химических сред [1,2]. При этом воздействие агрессивной среды на полимер может проявляться в изменении его структуры и свойств без нарушения целостности материала (растрескивание, разрыхление и набухание поверхности материала на определенную глубину) или сопровождаться его разрушением.

В связи с этим представляет научный интерес анализ процессов и явлений при взаимодействии химической среды с полимерами и разра-

ботка на его основе практических химико-механических методов обработки резанием заготовок из полимерных материалов.

Агрессивные среды в зависимости от характера взаимодействия с полимерами можно подразделить на физически и химически активные. Специфическое влияние оказывают на полимер поверхностно – активные вещества (ПАВ), которые могут принадлежать к обеим группам.

Действие физически активных сред заключается в диффундировании в полимер и ослаблении связи между молекулами, что приводит к снижению прочностных свойств поверхностного слоя материала. Агрессивные химические среды при контакте с полимерными материалами вызывают необратимые изменения химической структуры. Совокупность химических процессов, приводящих к изменениям химической структуры полимера и его молекулярной массы, называют химической деструкцией.

Влияние физически активных агрессивных сред на прочностные свойства полимерных материалов, определяющие сопротивляемость разрушению, может быть объемным (набухание) и поверхностным (адсорбция, поверхностная диффузия). В случае адсорбции только поверхностные участки твердого тела участвуют в процессе; при этом химический потенциал твердого тела по существу не изменяется. Под «поверхностью твердого тела» в этом смысле слова следует подразумевать не только наружную поверхность, но и внутреннюю поверхность вокруг групп молекул и, возможно, поверхность отдельных молекул. Очевидно, что эффективная поверхность твердого тела зависит от конфигурации его молекул и от таких характеристик диффундируемого вещества, как размер его молекул и их форма. Адсорбция будет происходить на тех внутренних участках поверхности твердого тела, которые образованы стенками пустот и пор, обладающих достаточным объемом и соответствующей формой для накопления молекул диффундирующего вещества. При набухании в физически активных средах обычно уменьшается прочность полимерного материала, но повышается его эластичность [1,2]. Снижение прочности полимера при его набухании может быть вызвано двумя причинами.

Во-первых, возникновением внутренних (местных) напряжений вследствие неравномерности набухания. В процессе сорбции растворителей полимерами часто наблюдаются резко разграниченные области с различной степенью набухания [2], особенно это характерно для полимеров в стеклообразном состоянии. Это явление обусловлено резкой зависимостью коэффициента диффузии от концентрации диффундирующего компонента в системе, а также наличием специфического взаимодействия полимера с веществом. В такой системе в процессе



сорбции из-за неодинаковой подвижности молекул сорбируемого вещества и сегментов полимера возникают нестационарные напряжения. Эти напряжения иногда очень значительны. Набухшие области полимера испытывают напряжения сжатия из-за соседства более жесткой ненабухшей части, в которой действуют растягивающие напряжения. Неравномерность процесса набухания и изменения поверхности, возникновение разнородных внутренних напряжений в образце приводит к образованию значительного числа микротрещин и внутренних микродефектов. Возникающие местные напряжения могут оказаться достаточными для разрыва «С-С» связей. Во-вторых, прочность может изменяться вследствие изменения межмолекулярного взаимодействия, происходящего в процессе набухания полимеров.

Однако, как было отмечено выше, набухание полимерного материала способствует и повышению его эластичности, то есть увеличению гибкости его цепей и соответственно снижению температуры стеклования. Увеличение гибкости цепей полимера способствует облегчению ориентации макромолекул полимера при воздействии механической нагрузки, в том числе силами резания при механической обработке режущим инструментом. В таком случае возникает эффект деформационного упрочнения материала, то есть прочность материала повышается именно в тот период, когда представляется целесообразным уменьшение сопротивляемости разрушению. В связи с этим можно заключить, что с точки зрения эффективности последующей механической обработки полимерных материалов набухание как результат взаимодействия агрессивной среды с полимером является нежелательным. Целесообразно проводить обработку полимеров агрессивной средой таким образом, что бы обеспечить растрескивание или разрыхление поверхностного слоя на требуемую глубину, без изменения химических свойств конкретного полимера.

Сущность адсорбционного действия среды при разрушении сводится к двум эффектам – внешнему (энергетическому) и внутреннему (механическому). Внутренний адсорбционный эффект возникает в результате адсорбции поверхностно – активных веществ на поверхности дефектов внутри твердого тела, что обеспечивает затруднение смыкания трещин внутреннее вытравливание, углубление и расширение дефектов, следствием чего является снижение прочности и хрупкость материала. Внешний эффект вызывается адсорбцией активной среды на внешней поверхности твердого тела, что приводит к снижению предела текучести и коэффициента упрочнения. Характеристики пластической деформации, сопротивление ползучести, усталостная прочность и внутреннее трение твердых тел значительно изменяются в зависимости от состояния поверхности. Прочность твердых тел пропорциональ-

на их поверхностной энергии, следовательно, факторы, вызывающие уменьшение свободной поверхностной энергии, т.е. уменьшение работы образования новых поверхностей, вызывают тем самым снижение прочности материала. Уменьшение в результате адсорбции поверхностной энергии на границе «тело – среда» облегчает процесс зарождения и развития трещин разрушения, что является причиной снижения прочности материала. Данное явление успешно проявляется при использовании в качестве агрессивной среды ПАВ.

Влияние ПАВ на прочность, твердость и деформируемость напряженных тел было обнаружено и широко исследовалось академиком П. А. Ребиндером. Эффект Ребиндера, т. е. уменьшение прочности под влиянием адсорбционного воздействия ПАВ, обнаружен для многих твердых тел, в том числе и для полимеров. Установлено [3], что ряд жидкостей (вода, уксусная кислота) являясь плохими смазочными материалами, обладают способностью сильно снижать удельную работу резания некоторых материалов. И наоборот, жидкости, сильно снижающие трение (этиловый спирт), слабо влияют на уменьшение удельной работы резания. Это объясняется адсорбционным эффектом снижения прочности.

При циклических деформациях полимерных материалов, а также при их контактировании с движущимися твердыми поверхностями происходит многократное наложение напряжения, что должно, по всей видимости, вносить определенную специфику в закономерности разрушения. Однако закономерности, характеризующие эти процессы в присутствии агрессивных сред, на сегодняшний день не изучены. Имеются незначительные сведения только для резин [1,2], что связано с широким их использованием в изделиях, подвергающимся циклическим деформациям в агрессивных средах.

Таким образом, в аспекте механической обработки полимерных заготовок, с учетом специфики взаимодействия полимерных материалов с различными агрессивными средами, представляется целесообразным проводить предварительную химическую обработку заготовок из полимерных материалов с целью повышения эффективности последующей обработки резанием. Процесс механической обработки резанием полимерных материалов можно рассматривать как разновидность процесса разрушения под действием магистральной трещины с образованием двух новых поверхностей – обработанная поверхность после резания и поверхность стружки. Следовательно, следует ожидать, что адсорбция ПАВ, уменьшая работу, необходимую для образования новых поверхностей, снижает сопротивление резанию, способствует разрыхлению поверхностных слоев. Происходит образование зоны предразрушения, наличие которой облегчает процесс деформирования сре-



заемого слоя материала, что является предпосылкой повышения производительности процесса и качества обработанной резанием поверхности [3].

При этом обработку полимерных материалов желательно производить соответствующими физически активными средами. В случае применения химических агрессивных сред кинетические параметры процесса взаимодействия среды и материала целесообразно принимать такими, что бы он происходил во внешней диффузионно-кинетической области.

На основании результатов вышеприведенного анализа, результатов проведенных экспериментальных исследований и выводов разработан и запатентован [7] способ обработки деталей из пластмасс. Сущность способа заключается в направленном изменении свойств обрабатываемого материала, путем предварительной химической обработки поверхностного слоя, с целью снижения сопротивления разрушению поверхностного слоя заготовки в зоне резания при последующем взаимодействии его с режущим инструментом.

Обработка поверхности детали химическим реагентом приводит к возникновению эффектов, освещенных выше, и, следовательно, к снижению прочности поверхностного слоя материала. Возникает структура материала, в которой часть химических и межмолекулярных связей разрушена, а другая часть напряжена. Таким образом, имеет место эффект “локального охрупчивания” части поверхности обрабатываемого материала.

Затем производят механическую обработку детали режущим инструментом, например токарную. При этом характер процесса стружкообразования качественно меняется – отделение материала срезаемого слоя происходит преимущественно в результате хрупкого разрушения, так как усилие деформации срезаемого слоя материала снижается за счет явления “охрупчивания”. Как известно [3,6], энергия хрупкого разрушения значительно меньше энергии, необходимой для пластического разрушения. Разнообразные дефекты в зоне опережающих деформаций образуются при значительно меньших напряжениях, что обеспечивает благоприятные условия для зарождения пластических сдвигов и более стабильное распространение магистральной трещины впереди режущего клина вдоль линии среза. Снижение уровня напряженного состояния материала способствует также снижению температуры в зоне резания, что является дополнительной предпосылкой к снижению уровня шероховатости обработанной поверхности и производительности процесса механической обработки заготовок из пластмасс.

Процесс снижения механических свойств поверхности твердых полимерных материалов при взаимодействии с агрессивной средой в общем случае определяется двумя диффузионными параметрами – временем обработки средой и глубиной обработанного слоя материала.

Как было уже указано, полимерные материалы имеют внутренние и поверхностные микродефекты, обусловленные технологическими процессами их производства. При действии среды микродефекты развиваются в макродефекты, например макротрещины. Поверхностные дефекты в случае воздействия среды являются более опасными, чем внутренние, в которые среда в начальный период обработки не проникает. Таким образом, время обработки материалов средой можно выразить как

$$\tau_{об} = \tau_x + \tau_D, \quad (1)$$

где  $\tau_x$  – время проникновения жидкости к вершинам суб- и микро-трещин;

$\tau_D$  – время диффузии растворителя (ПАВ) с поверхности микро-трещин в микрообъем материала.

Время проникновения среды  $\tau_x$  определяется скоростью движения вязкой смачивающей жидкости внутри микро-трещины. Рассмотрим движение жидкости в модели трещины – щели. Очень малые поперечные сечения щели дают основание рассматривать движение вязкой жидкости в ней как плоский гидродинамический поток. Ускорения в таком потоке отсутствуют, а скорость пропорциональна первой степени градиента давления, т.е.:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial v_y}{\partial t} = 0; \quad v_x = k \frac{\partial P}{\partial x}; \quad v_y = k \frac{\partial P}{\partial y}.$$

Сумма сил, действующих в таком потоке, равна нулю. Определим силы, действующие на элемент жидкости  $l_x l_y l_z$  в щели. Сила, возникающая в результате разности удельной поверхностной энергии жидкости и твердого тела, характеризуется давлением растекания (коэффициентом растекания). Действующая в направлении оси  $X$  сила:

$$F_s = 2S_{мж}l_y,$$

где  $S_{мж}$  – коэффициент растекания является термодинамическим параметром системы жидкость-твердое тело и выражается как

$$S_{мж} = \gamma_{мг} - (\gamma_{жг} - \gamma_{мж}).$$

Сила капиллярного давления, возникающая в трещине

$$F\gamma_x = h_z l_y \frac{2\gamma_{жг}}{h_z/2} = 4\gamma_{жг} l_y.$$



Сила, определяемая гидростатическим напором столба жидкости высотой  $H$  над уровнем трещины:

$$F_{h_x} = \rho g H h_z l_y.$$

Сила вязкого трения для плоского потока

$$F_{\eta_x} = -2\eta \frac{dv_x}{dh_z} l_x l_y.$$

Сила тяжести, действующая на элемент объема  $V = h_z l_x l_y$  с плотностью  $\rho$ :

$$F_{тяж} = mg = V\rho g = h_z l_x l_y \rho g.$$

Составим выражение для суммы всех действующих сил:

$$\sum F = l_y \left[ 2S_{ТЖ} + 4\gamma_{ЖГ} + \rho g H h_z - 2\eta \frac{dV_x}{dh_z} l_x + h_z l_x l_y \rho g \right] = 0. \quad (2)$$

Преобразуем уравнение (2)

$$\frac{dV_x}{dh_z} 2\eta l_x = (2S_{ТЖ} + 4\gamma_{ЖГ}) + \rho g (H + l_x) \cdot h_z,$$

откуда

$$dV_x = \frac{1}{2\eta l_x} [2S_{ТЖ} + 4\gamma_{ЖГ} + \rho g (H + l_x) h_z] \cdot dh_z. \quad (3)$$

Интегрируем обе части уравнения (3):

$$\begin{aligned} \int dV_x &= \frac{1}{2\eta l_x} \left[ \int (2S_{ТЖ} + 4\gamma_{ЖГ}) dh_z + \rho g (H + l_x) \cdot \int h_z dh_z \right], \\ V_x &= \frac{1}{2\eta l_x} \left[ (2S_{ТЖ} + 4\gamma_{ЖГ}) h_z + \rho g (H + l_x) \cdot \frac{h_z^2}{2} \right], \quad (4) \\ V_x &= \frac{h_z}{2\eta l_x} \left[ 2S_{ТЖ} + 4\gamma_{ЖГ} + \frac{\rho g (H + l_x) h_z}{2} \right] \text{ или окончательно} \\ V_x &= \frac{h_z}{\eta l_x} \left[ S_{ТЖ} + 2\gamma_{ЖГ} + \frac{\rho g (H + l_x) h_z}{4} \right]. \end{aligned}$$

Подставим выражение (4) в формулу  $d\tau_x = \frac{dl_x}{V_x}$ , т.е. в  $V_x d\tau_x = dl_x$ :

$$\begin{aligned} \frac{h_z}{\eta l_x} \left[ S_{ТЖ} + 2\gamma_{ЖГ} + \frac{\rho g (H + l_x) h_z}{4} \right] \cdot d\tau_x &= dl_x, \\ \frac{h_z}{\eta} \left[ S_{ТЖ} + \gamma_{ЖГ} + \frac{\rho g (H + l_x) h_z}{4} \right] \cdot d\tau_x &= l_x dl_x \end{aligned}$$

Считая переменные левой части независимыми от  $\tau_x$ , получим:

$$\frac{h_z}{\eta} \left[ S_{ТЖ} + 2\gamma_{ЖГ} + \frac{\rho g H h_z}{4} \right] \cdot \tau_x = \frac{l_x^2}{2},$$
$$\text{или } \tau_x = \frac{l_x^2 \eta}{2h_z} \cdot \frac{1}{\left( S_{ТЖ} + 2\gamma_{ЖГ} + \frac{\rho g (H + l_x) h_z}{4} \right)}. \quad (5)$$

В общем случае движущей силой диффузии, как и большинства физико-химических процессов, является разность термодинамических или химических процессов. Путем перераспределения вещества система стремится к выравниванию локальных разностей потенциалов, приближаясь к термодинамическому равновесию. В более частном случае, когда внутренняя энергия диффузионной системы не подвергается существенным изменениям, движущей силой процесса можно считать разность концентраций диффундирующего вещества. Исходным дифференциальным уравнением для диффузии низкомолекулярных веществ в полимерах, так же как и для других диффузионных процессов, является общеизвестное уравнение Фика:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \quad (6)$$

Данное уравнение описывает, как известно, процесс накопления, т.е. изменения концентрации вещества в различных точках тела в зависимости от времени. Коэффициент диффузии  $D$  – материальная константа, является мерой скорости, с которой система способна при данных условиях выравнивать разности концентраций.

Для полубесконечного полимерного тела, ограниченного только одной плоскостью при  $x=0$ , решение уравнения (6) при начальном  $C=0$  при  $\tau=0$  и граничном условии  $C=C_0$  при  $x=0$  имеет вид

$$C_x = C_0 (1 - \text{erf} z), \quad (7)$$

где  $\text{erf} z$  – функция ошибок Гаусса;

$$z = \frac{x}{2\sqrt{D\tau_D}} \text{ и } \text{erf} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-y^2} dy.$$

Решение уравнения (7) можно представить в виде ряда. Разложим показательную функцию в степенные ряды, получим

$$e^y = 1 + y + \frac{y^2}{2} + \dots + \frac{y^n}{n!}, \quad (8)$$

В выражение (8) подставим  $-y^2$  вместо  $y$ , тогда





$$e^{-y^2} = 1 - y^2 + \frac{y^4}{2} + \frac{y^6}{6} + \dots + \frac{(-1)^n y^{2n}}{n!} \quad (9)$$

Интегрируем почленно (9)

$$\int e^{-y^2} dy = y - \frac{y^3}{3} + \frac{y^5}{10} - \frac{y^7}{42} + \dots + \frac{(-1)^n y^{2n+1}}{n!(2n+1)}; \quad (10)$$

Подставляя пределы по формуле Ньютона-Лейбница, окончательно получаем

$$\int_0^z e^{-y^2} dy = z - \frac{z^3}{3} + \dots + \frac{(-1)^n z^{2n+1}}{n!(2n+1)}. \quad (11)$$

Тогда уравнение (7) можем записать в виде

$$C_x = C_o \left[ 1 - z + \frac{z^3}{3} + (-1)^{n-1} \frac{z^{2n+1}}{n!(2n+1)} \right] \frac{2}{\sqrt{\pi}}. \quad (12)$$

Ограничиваясь первыми двумя членами разложения, получим

$$C_x = C_o (1 - z) \frac{2}{\sqrt{\pi}}, \text{ откуда } z = 1 - \frac{C_x \sqrt{\pi}}{C_o 2} \text{ или окончательно}$$

$$\frac{x}{2\sqrt{D\tau_D}} = 1 - \frac{C_x \sqrt{\pi}}{C_o 2}. \quad (13)$$

Из уравнения (13), получим выражение для расчета глубины  $x$  проникновения диффузанта концентрации  $C_x$  за время диффузии  $\tau_D$ :

$$x = 2\sqrt{D\tau_D} \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{\pi}C_x}{2C_o}\right) = \sqrt{\tau_D} \cdot 2\sqrt{D} \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{\pi}C_x}{2C_o}\right) \text{ или окончательно}$$

$$x = \sqrt{\tau_D} \cdot \sqrt{D} \cdot \sqrt{\pi} \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} - \frac{C_x}{C_o}\right) = (\tau_D D \pi)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} - \frac{C_x}{C_o}\right) \quad (14)$$

В том случае, когда требуется установить продолжительность обработки  $\tau_D$  агрессивной средой для достижения требуемого значения глубины  $x$  из уравнения (13) можно вывести следующую зависимость:

$$\tau_D = \frac{x^2}{D\pi \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} - \frac{C_x}{C_o}\right)^2}. \quad (15)$$

При длительных воздействиях жидких агрессивных сред на полимерные материалы, как следует из решений дифференциальных уравнений переноса, наступает стационарное состояние процесса диффу-

зии, соответствующее условию  $t \rightarrow \infty$ . Для такого состояния справедливо условие  $\frac{\partial c}{\partial t} = 0$ , которое означает, что концентрация  $C$ , спустя значительное время взаимодействия, становится постоянной, т. е.  $C = \text{const}$  в отдельно взятой точке  $X$  при  $t \rightarrow \infty$ , хотя в разных местах  $X_i$  могут быть разные  $C_i$  (но неизменные во времени).

Граничное условие массопереноса при движущейся границе справедливо для системы жидкость – полимер не только в случае растворения полимерного вещества с поверхности в данной жидкости, но и при химическом взаимодействии агрессивной среды с поверхностными слоями. В таких случаях вводят подвижную систему координат, начало которой связывают с движущейся границей тела, т.е. с его поверхностью. Для одномерной задачи распределение концентрации подчиняется уравнению

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial t}. \quad (16)$$

Считая  $\frac{\partial c}{\partial t} = 0$ , получаем уравнение

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + u \frac{\partial c}{\partial x} = 0. \quad (17)$$

Воспользовавшись отсутствием функции  $C(x)$  в уравнении (17), можно понизить порядок уравнения, найдя зависимость от  $x$  не функции  $C$ , а её производной, т. е. выяснить  $\frac{\partial c}{\partial x}(x)$ .

Для этого считаем, что  $\frac{\partial c}{\partial x} = \varphi(x)$ , тогда можем записать, что  $\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial c}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} (\varphi(x))$  или  $\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{\partial \varphi}{\partial x}$ , где  $\varphi = \varphi(x)$ .

С учетом данных обозначений уравнение (17) примет вид

$$D \frac{\partial \varphi}{\partial x} + u \varphi = 0. \quad (18)$$

Учитывая, что  $\varphi$  зависит только от  $x$ , запишем уравнение (18) в обычных производных:

$$D \frac{d\varphi}{dx} + u \varphi = 0. \quad (20)$$

Преобразуя (20) и разделяя переменные, получим

$$D d\varphi = -u \varphi dx \quad \text{или} \quad D \frac{d\varphi}{\varphi} = -u dx \quad (21)$$



Интегрируем (5), вынося постоянные множители  $D$  и  $u$ :

$$D \int \frac{d\varphi}{\varphi} = -u \int dx$$

$$D \cdot \ln \varphi = -ux + a,$$

где  $a$  – постоянная.

Выражаем  $\ln \varphi = \frac{-ux}{D} + \frac{a}{D}$  и  $\varphi = e^{\frac{-ux+a}{D}}$

Учтем, что  $e^{\frac{-ux+a}{D}} = e^{\frac{-ux}{D}} \cdot e^{\frac{a}{D}}$  и обозначим  $e^{\frac{a}{D}}$  как  $a_1$ . Тогда  $\varphi(x) = a_1 e^{\frac{-ux}{D}}$ .

Поскольку  $\varphi(x) = \frac{dc}{dx}$ , получаем уравнение

$$\frac{dc}{dx} = a_1 e^{\frac{-ux}{D}}, \text{ т. е. } dc = a_1 e^{\frac{-ux}{D}} dx. \quad (22)$$

Интегрируя (22), имеем

$$\int a_1 e^{\frac{-ux}{D}} dx = a_1 \int e^{\frac{-ux}{D}} dx = a_1 e^{\frac{-ux}{D}} \cdot \left(\frac{-D}{u}\right) + a_2,$$

где  $a_2$  – постоянная.

Так как  $\int dc = c$ , то можно записать выражение для следующей зависимости

$$C(x) = a_2 - \frac{a_1 D}{u} \cdot e^{\frac{-ux}{D}}. \quad (23)$$

Постоянные  $a_1, a_2$  находим из граничных условий: при  $x=0$   $C(0) = C_0$ ; при  $x=\infty$   $C(\infty) = C_\infty$ .

$$C(0) = a_2 - \frac{a_1 D}{u} e^{\frac{-u \cdot 0}{D}} = C_0,$$

$$C(\infty) = a_2 - \frac{a_1 D}{u} e^{\frac{-u \cdot \infty}{D}} = C_\infty.$$

Поскольку  $e^0 = 1$  и  $e^{-\infty} = 0$ , имеем

$$\begin{cases} a_2 - \frac{a_1 D}{u} = C_0 \\ a_2 - \frac{a_1 D}{u} \cdot 0 = C_\infty \end{cases}.$$

Из 2 уравнения имеем  $a_2 = C_\infty$  и подставляя его в 1 уравнение, получим

$$C_{\infty} - \frac{a_1 D}{u} = C_0, \text{ откуда } \frac{a_1 D}{u} = C_{\infty} - C_0.$$

Подставляя в найденную функцию (23) получим

$$C(x) = C_{\infty} - (C_{\infty} - C_0) \cdot e^{-\frac{ux}{D}} \quad (24)$$

Уравнение (8) равносильно

$$(C_{\infty} - C_0) \cdot e^{-\frac{ux}{D}} = C(x) - C_{\infty} \text{ или окончательно}$$

$$\frac{C(x) - C_{\infty}}{C_{\infty} - C_0} = e^{-\frac{ux}{D}}. \quad (25)$$

Таким образом, получено выражение, с помощью которого можно оценить текущее значение концентрации среды; как следует из анализа выражения (25), распределение концентрации агрессивной среды по толщине материала подчиняется экспоненциальному закону.

Выводы по работе:

1. Выполнен анализ процессов, имеющих место при взаимодействии поверхностно-активных веществ с полимерными материалами, на основании которого обоснована предварительная химическая обработка заготовок из полимерных материалов перед механической обработкой.
2. Получено уравнение с экспоненциальным распределением концентрации поверхностно-активных веществ по толщине полимерного материала, а также выведены выражения для оценки основных параметров процесса диффузии.

### Библиографические ссылки

1. Манин В. Н., Громов А. Н. Физико-химическая стойкость полимерных материалов в условиях эксплуатации. Л., 1980.
2. Зуев Ю. С. Разрушение полимеров под воздействием агрессивных сред. М., 1972.
3. Подураев В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов. М., 1974.
4. Тагер А. А. Физикохимия полимеров. М., 1978.
5. Бартнев Г. М., Зуев Ю. С. Прочность и разрушение высокоэластичных материалов. М., 1964.
6. Аскадский А. А., Матвеев Ю. И. Химическое строение и физические свойства полимеров. М., 1983.
7. Еренков О. Ю. Способ обработки деталей из пластмасс/ Патент № 2203183 от 27.04.2003.