

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

УДК 5.19.85: 621.01

С. А. ЧИЖИК¹, М. Л. ХЕЙФЕЦ², С. А. ФИЛАТОВ¹**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ
В ПРОЦЕССАХ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА И ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**¹Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск,²ГНПО «Центр» НАН Беларуси, Минск

(Поступила в редакцию 17.07.2015)

Введение. В технологическом процессе можно управлять формированием свойств материала и поверхности изделия, чтобы свойства, положительно влияющие на качество детали, сохранить в течение всего технологического процесса, а свойства, влияющие отрицательно, ликвидировать в его начале, используя существующие в технологической цепочке «барьеры» [1, 2]. Одни технологические факторы не могут преодолеть эти барьеры, в таком случае их влияние на конечные свойства объекта отсутствует. Другие факторы проходят такие барьеры, но при этом значительно ослабевает их влияние на конечные свойства изделия [3, 4].

Анализ формируемых физико-механических параметров качества, структур материала, геометрических характеристик поверхностей образующихся диссипативных структур позволяет исследовать технологическую наследственность последовательности воздействий высокоинтенсивных физических полей в процессах послойного синтеза изделий.

Определение устойчивости состояний синтезируемого и обрабатываемого материала. Потоки энергии и материала в высокоинтенсивных физических полях определяют силовое воздействие на обрабатываемую поверхность. При этом скорость и ускорение образующих обрабатываемую поверхность воздействий фиксируются на всех участках их прохождения. Величина энергии импульса пропорциональна площади, расположенной под кривой изменения свойств материала, которую можно определить интегрированием. Ускорение, т. е. первая производная от скорости, получаемая дифференцированием, характеризует величину и положение силы, сопротивления проникновению импульса в поверхностный слой [5, 6].

Энергетическое воздействие сопровождается тепло-, массопереносом и другими явлениями, причем поскольку при фазовых переходах II рода [7, 8] теплота их равна нулю, первые производные свободной энергии по параметрам состояния непрерывны, а вторые производные меняются скачкообразно. Поэтому рассматривают вторую производную от импульса энергии $P\tau$ по глубине H поверхностного слоя.

Для глубины распространения $H = f^*(P\tau)$, согласно правилу дифференцирования функции, обратной данной $P\tau = \varphi^*(H)$:

$$\frac{\partial^2 (P\tau)}{\partial H^2} = \frac{\partial P\partial\tau}{\partial^2 H},$$

так как ускорение – производная скорости v

$$\frac{\partial v}{\partial\tau} = \frac{\partial^2 H}{\partial\tau^2},$$

то

$$\frac{\partial^2 H}{\partial \tau} = \partial v,$$

тогда

$$\frac{\partial^2 (P\tau)}{\partial H^2} = \frac{\partial P}{\partial v}.$$

Таким образом, вторая производная от импульса энергии по глубине распространения определяет условие устойчивости Г. Циглера $\partial P/\partial v \geq 0$, показывающее, что стационарное состояние обрабатываемой системы ассимптотически устойчиво по А. М. Ляпунову [9, 10].

В результате вторую производную от импульса энергии по глубине поверхностного слоя можно рассматривать как технологический барьер, определяющий границу фазового перехода и выделяющий поверхности раздела слоев материала с различными структурами и свойствами [5, 6].

Моделирование клеточными автоматами трансформации структур материала. Для изучения явлений пространственно-временного распределения результатов технологических воздействий необходимо исследовать материал изделия как распределенную систему с позиции общей теории систем [11]. Свойства такой системы определяются свойствами ее элементов и организацией их связей и взаимодействий. Использование общей теории систем позволяет определить роль локальных свойств элементов и организации их связей в глобальных свойствах системы. Теория распределенных систем важна для технологических приложений, поскольку в материалах рассматривают различные уровни организации: атомно-молекулярный и структурно-фазовый. Свойства элементов этих уровней принципиально различны, тем не менее на каждом из них могут решаться одинаковые задачи.

Для описания свойств материала в первую очередь рассмотрим распределенную систему взаимодействующих элементов в структурно-фазовом масштабе технологической среды [12].

Состояние и простейшие акты поведения формально возбудимой среды можно моделировать на дискретной однородной среде логических функций [13]. Этот класс моделей называют «непрерывными средами», а дискретные модификации – «типами непрерывных сред», поскольку они удовлетворяют основному принципу: функционально связными по передаче возбуждения являются только геометрически соседние точки.

В общем случае дискретные модели имеют структуру простых сетей N_s^n , а непрерывные модели определяются на непрерывных многообразиях типа действительного пространства R^n с использованием естественных «топологических связей» этого пространства [14]. Для выделения моделей с локальными взаимодействиями точек-клеток используют термин «точечная ткань», поскольку возбуждение осуществляется по принципу «от точки к точке». Точечная ткань – это множество локально взаимодействующих точек-клеток. Как модель непрерывной возбудимой среды точечная ткань является кинематической моделью и удобна для изучения глобальных свойств распространения волн возбуждения без учета динамических эффектов, присущих реальным технологическим средам.

Дискретные модели ткани определяют на сетевых графах. Задание некоторого графа G означает задание возможных функциональных связей в множестве клеток-вершин X . Дальнейший переход от данной структурной схемы $G(X)$ к некоторой модели ткани $T(X)$ связан с выбором формы функционального оснащения структурных элементов графа. При формальном подходе вершинам приписываются некоторые свойства клеток, а ребрам – свойства передачи некоторых воздействий, влияющих на свойства вершин-клеток [12].

В общем случае свойства каждой вершины $x \in X$ можно описывать некоторым множеством состояний $Z = \{z_1, \dots, z_m\}$ с указанием:

- 1) графа переходов $P(Z)$ в этом множестве состояний;
- 2) свойств переходов в P для разных воздействий, действующих на данную клетку x через внутренние или внешние связи;
- 3) связи состояний ребер-связей, выходящих из x , с состоянием клетки x .

Математическое содержание этих общих формальных отношений может широко варьироваться. При этом для описания процесса миграции одиночного акта смены состояний клеток

можно использовать их представление в качестве конечных автоматов [15].

Метод клеточных автоматов предполагает описание реальной физико-химической системы большим числом составляющих ее элементов – клеток, каждая из которых изменяет свое состояние при новом шаге дискретного времени в зависимости от того, какими были прежде эта клетка и ее ближайшее окружение.

Процесс возбуждения клетки основывается на понятиях стимула и порога с выделением состояний покоя (z_0), возбуждения (z_+), рефрактерности (z_-).

Состояние покоя z_0 является устойчивым при отсутствии внешних по отношению к данной клетке входных стимулов j_+ . Чтобы совершился переход в возбужденное состояние $z_0 \rightarrow z_+$, необходимо выполнение условия $j_+ \geq \aleph$, т. е. стимул должен превышать некоторый пороговый уровень \aleph , который будем вначале полагать равным единице, $\aleph = 1$. Возбуждение или переход $z_0 \rightarrow z_+$ при $j_+ \geq 1$ происходит мгновенно, но затем в состоянии z_+ клетка находится конечное время θ_+ , по истечении которого автоматически происходит переход в рефрактерное состояние $z_+ \rightarrow z_-$. Если θ_- – время жизни клетки в рефрактерном состоянии z_- , которое является состоянием невозбудимости клетки, то полный цикл одиночного возбуждения: $z_0 \rightarrow z_+ \rightarrow z_- \rightarrow z_0$ длится время $m = \theta_+ + \theta_-$. Этот цикл клетки всегда проходит по автономной программе и внешней стимуляцией можно регулировать только момент запуска цикла возбуждения. В пределе, когда клетка находится под постоянным действием надпорогового стимула, в конце цикла вместо перехода $z_- \rightarrow z_0$ сразу осуществляется переход $z_+ \rightarrow z_+$, т. е. новое возбуждение.

Возбужденное состояние z_+ отличается от прочих главным образом тем, что в нем клетка является сама источником стимулирующего воздействия, которое называется выходным и обозначается j_- . Этой схеме можно дать графовое отображение $P(Z)$, где $Z = \{z_0, z_+, z_-\}$ (рис. 1, а).

При дискретном представлении времени τ удобно считать целыми длительности θ_+ и θ_- , чтобы в графе $P(Z)$ состояния z_+ и z_- заменить цепочками состояний $z_+ = (z_1, \dots, z_i)$, $z_- = (z_{i+1}, \dots, z_m)$, где $i = \theta_+$, $m = 1 + \theta_+ + \theta_-$ (рис. 1, б).

Модификация графа $P(Z)$ при разбиении на тактовые подсостояния состояния $z_0 = (z_1, \dots, z_i)$, где $i = \theta_0$, дает жизненный цикл клетки $m = \theta_0 + 2$ (рис. 1, в). Состояние клетки в произвольный момент τ можно характеризовать вектором $\mathbf{z} = \mathbf{z}(\tau)$ порядка $m + 1$. Если в данный момент τ клетка находится в состоянии k , то $\mathbf{z}(\tau) = \mathbf{e}_k$, т. е. в этот момент только k -я компонента вектора \mathbf{z} равна 1, а остальные – нулю.

Смена состояний за один такт описывается линейным уравнением

$$\mathbf{z}(\tau + 1) = \mathbf{Pz}(\tau)$$

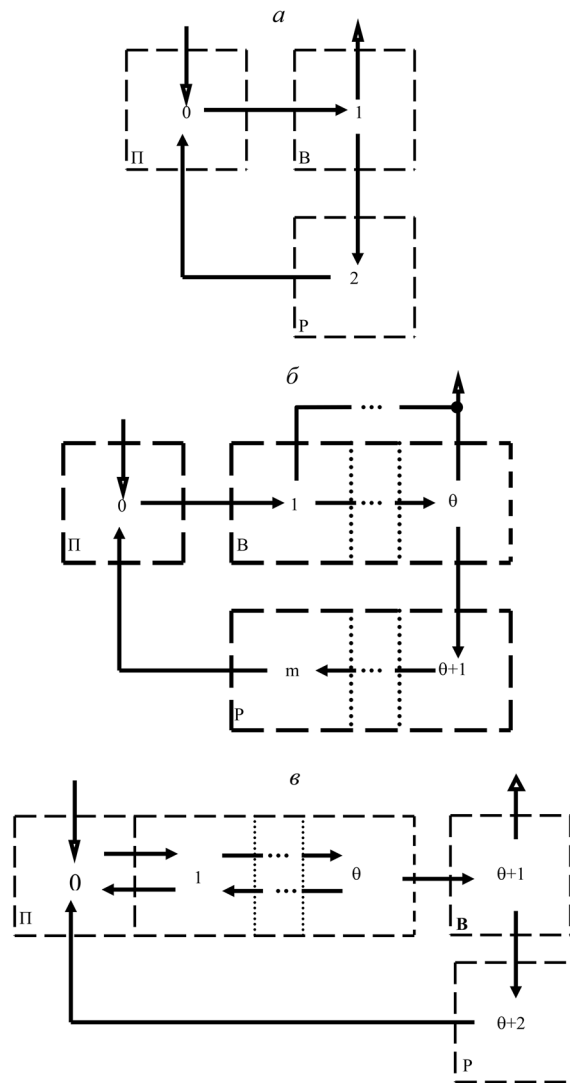


Рис. 1. Графы состояний покоя (П), возбуждения (В), рефрактерности (Р) возбудимой клетки-автомата при упрощенной схеме (а), разбиении состояний возбуждения $\{1, \dots, \theta\}$ и рефрактерности $\{\theta + 1, \dots, m\}$ на тактовые подсостояния (б) и разбиение состояния покоя $\{1, \dots, \theta\}$ на тактовые подсостояния (в)

с матрицей перехода

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} q & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & q \\ p & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & p \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

которая является функцией времени $\mathbf{P} = \mathbf{P}(\tau)$, что заложено в свойствах переменных элементов p и q . Эти элементы выражаются функцией единичного скачка, аргументом в котором является разность стимула и порога: $p = \varepsilon(j_+ - 1)$, $q = 1 - \varepsilon(j_+ - 1)$, т. е. если $j_+ \geq 1$, то $p = 1$, $q = 0$, а если $j_+ < 1$, то $p = 0$, $q = 1$.

Для описания межклеточных взаимодействий необходимо определить поведение во времени выходного стимула клетки $j_-(\tau)$, который можно выразить в виде скалярного произведения вектора состояния $\mathbf{z}(\tau)$ с вектором $\mathbf{a}_+ = \mathbf{e}_1 + \dots + \mathbf{e}_{0+}$, являющимся «индикатором» состояний возбуждения:

$$j_-(\tau) = \mathbf{a}_+ \cdot \mathbf{z}(\tau).$$

Полное описание межклеточных взаимодействий в рамках данного формализма требует привлечения матрицы связей клеток, т. е. определения структурной модели ткани [12].

На основании описанной автоматной схемы возбуждения клетки можно определить стохастические модификации модели возбуждения, в которых вектор \mathbf{z} описывает распределение вероятностей нахождения клетки в каждом из состояний множества Z , а элементы матрицы \mathbf{P} представляют вероятности переходов между состояниями. Тогда p – вероятность перехода в возбужденное состояние при действии стимула j_+ , $p = \alpha \varepsilon(j_+ - 1)$, где число $\alpha < 1$; при этом $q = 1 - p$. Наиболее общей является модель, в которой все переходы между состояниями случайны и длительности состояний возбуждения и рефрактивности θ_+ и θ_- представляют собой случайные величины. Содержательной является модель с детерминированными длительностями θ_+ и θ_- , когда вероятностным образом определяется только переход $z_0 \rightarrow z_+$.

Рассмотренные графы состояний возбудимой клетки-автомата (рис. 1) в совокупности описывают поведение клеточного автомата технологической среды при последовательности воздействий в высокоинтенсивных физических полях на операциях комбинированной обработки при послойном синтезе изделия [15].

Анализ на точечной ткани движения фронта передачи свойств в материале. Структура точечной ткани $T(X)$ на множестве вершин-клеток X задается матрицей связей Γ , порядок которой равен $|X|$. Выделим подмножества X_0 , X_+ , X_- , отвечающие разным состояниям вершин, $X = X_0 \cup X_+ \cup X_-$, $X_0 \cap X_+ \cap X_- = \emptyset$, и введем векторы-индикаторы этих множеств: \mathbf{u}_0 , \mathbf{u}_+ , \mathbf{u}_- . Порядок каждого из этих векторов равен $|X|$; отличны от нуля и равны 1 те элементы, например, вектора \mathbf{u}_0 , которые соответствуют вершинам $x \in X_0$ и т. д. В общем случае как сами множества X_0 , X_+ , X_- , так и их индикаторы являются функциями времени τ , которое считается дискретным. Вершина x является в возбужденном состоянии источником возбуждения для всех тех вершин, в которые от нее идут связи. Индикатор множества точек, испытывающих возбуждающее воздействие, равен $\Gamma \mathbf{u}_+(\tau)$. Из этого вектора следует вычесть векторы множеств уже возбужденных точек и находящихся в рефрактерности, тогда в векторе

$$\mathbf{u}(\tau) = \Gamma \mathbf{u}_+(\tau) - m \mathbf{u}_-(\tau)$$

положительные компоненты соответствуют точкам $x \in X_0$, а числовой коэффициент m равен максимальной компоненте вектора $\Gamma \mathbf{e}$, где \mathbf{e} – вектор-индикатор множества X . Чтобы его остальные компоненты были несущественны, следует ввести нелинейную операцию «отсечение», используя эпсилон-функцию от векторного аргумента, определяемую как вектор:

$$\varepsilon(\mathbf{u}) = (\varepsilon(\mathbf{u}_0), \dots, \varepsilon(\mathbf{u}_m))',$$

где $\mathbf{u} = (\mathbf{u}_0, \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_m)'$. Вектор $\varepsilon(\mathbf{u})$ имеет единичные компоненты, соответствующие положительным компонентам вектора \mathbf{u} , остальные компоненты вектора $\varepsilon(\mathbf{u})$ равны нулю. Поэтому, с одной стороны, вектор $\varepsilon(\mathbf{u})$ является индикатором точек, возбуждающихся в следующем такте. С другой стороны, последний индикатор равен разности $\mathbf{u}_+(\tau + 1) - \mathbf{u}_+(\tau)$.

Нелинейное рекуррентное уравнение миграции возбуждения описывается уравнением [12]

$$\mathbf{u}_+(\tau + 1) = \mathbf{u}_+(\tau) + \varepsilon(\Gamma\mathbf{u}_+(\tau) - m\mathbf{u}_+(\tau) - m\mathbf{u}_-(\tau)),$$

где полагается, что порог возбуждения покоящихся точек меньше воздействия одиночной возбужденной точки, т. е. $\aleph < 1$.

Запись уравнения существенно упрощается, если ввести пороговый вектор $\mathbf{h}(\tau)$, компоненты которого равны \aleph для $x \in X_0$, а для остальных точек X компоненты этого вектора не меньше $m\aleph$. Тогда уравнение примет вид [12]

$$\mathbf{u}_+(\tau + 1) = \mathbf{u}_+(\tau) + \varepsilon(\Gamma\mathbf{u}_+(\tau) - \mathbf{h}(\tau)).$$

Для простых сетей, которые моделируют дискретные среды, возбуждающими для покоящихся точек являются только те точки множества X_+ , которые образуют «передний фронт» возбуждения. Поэтому целесообразно ввести вектор-индикатор $\chi(\tau) = \mathbf{u}_+(\tau) - \mathbf{u}_+(\tau - 1)$ для точек, возбуждающихся в момент τ . Тогда эволюцию фронта возбуждения можно описывать уравнением [12]:

$$\chi(\tau + 1) = \varepsilon(\Gamma\chi(\tau) - \mathbf{h}(\tau)).$$

В результате график функции $\chi(\tau)$, построенный на множестве $X \times [\mathbb{R}^1]$, где множество $[\mathbb{R}^1]$ представляет дискретные моменты времени, называется траекторией волны возбуждения [12, 14].

Обозначим через $\Phi(x, \tau)$ множество точек, индикатором которого служит вектор $\chi(\tau)$. Тогда траектория распространения возбуждения представляется объединением множеств $\Phi(x, \tau)$ для всех моментов времени τ существования возбуждения в $T(X)$.

Пусть до момента $\tau = 0$ в $T(X)$, отсутствует возбуждение, а в начальный момент внешним воздействием возбуждаются точки множества $X_+(0)$. Последовательно применяя уравнение, можно описать последующую миграцию возбуждения для произвольных начальных множеств $X_+(0)$.

Волна возбуждения $\mathbf{u}_+(\tau) = \Phi(\tau)$ для $\tau \geq 0$ называется фундаментальной, если $X_+(0) = \{x_0\}$ — одиночная точка $x_0 \in X$ и $\mathbf{u}_+(\tau) \equiv 0$ для $\tau < 0$ [12, 14].

Фундаментальная волна $\Phi(\tau)$ представляет «ответ» среды на локальное возмущение, которое для точечной ткани является актом возбуждения одиночной точки. Понятие фундаментальной волны связано с понятием «порядкового множества» вершин графа ткани. Если порог покоя $\aleph \leq 1$, то в каждом такте фронт фундаментальной волны «окупирует» в графе ткани $T(X)$ вершины одного порядка по отношению к начально возбужденной вершине x_0 , т. е. фундаментальное множество $\Phi(x, \tau)$ есть множество вершин порядка τ . Например, в однородных сетях N_s^2 для $s = 3, 4, 6, 8$ (рис. 2) вершины последовательных фундаментальных фронтов $\Phi(x, \tau)$ (рис. 3) располагаются в соответствии с величинами периметров элементарных контуров.

В рассматриваемых дискретных моделях в отличие от непрерывных воспроизводятся эффекты суммации воздействий [13], которые могут быть исследованы при оценке возможности распространения возбуждения в простых сетях при разных величинах порога покоя \aleph [12].

Траектория $\chi(\tau)$ называется конечной, если существует такой конечный момент времени τ_0 , что $\chi(\tau) = 0$ при $\tau > \tau_0$, и если $\chi(\tau) \neq 0$ при $\tau \leq \tau_0$.

Траектория имеет длительность τ_0 , если она инициирована в моменты $\tau = 0$ и $\tau_0 > 0$. Распро-

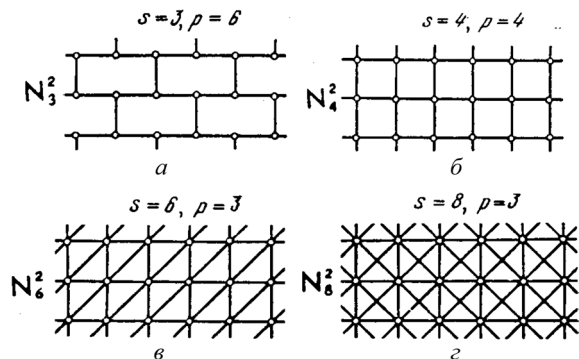


Рис. 2. Графы простых, двумерных N_s^2 сетей с величинами периметров p элементарных контуров, однородных по степени связности вершин: а, б, в, г — $s = 3; 4; 6; 8$ соответственно

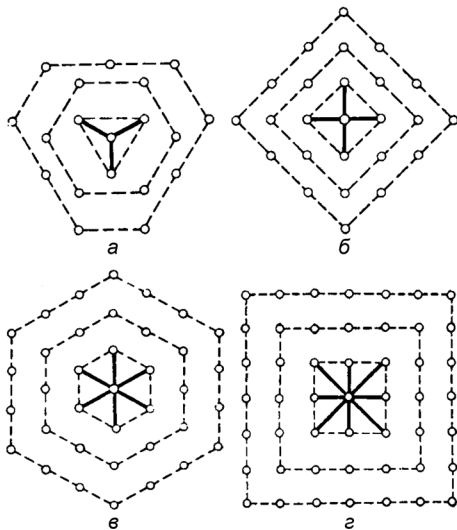


Рис. 3. Последовательные фундаментальные фронты в простых двумерных сетях связности: а, б, в, г – $s = 3; 4; 6; 8$ соответственно

странение, которое инициируется начальным возбуждением некоторого минимального множества точек $\Phi(x, 0)$, где $|\Phi(x, 0)| > 1$ [12].

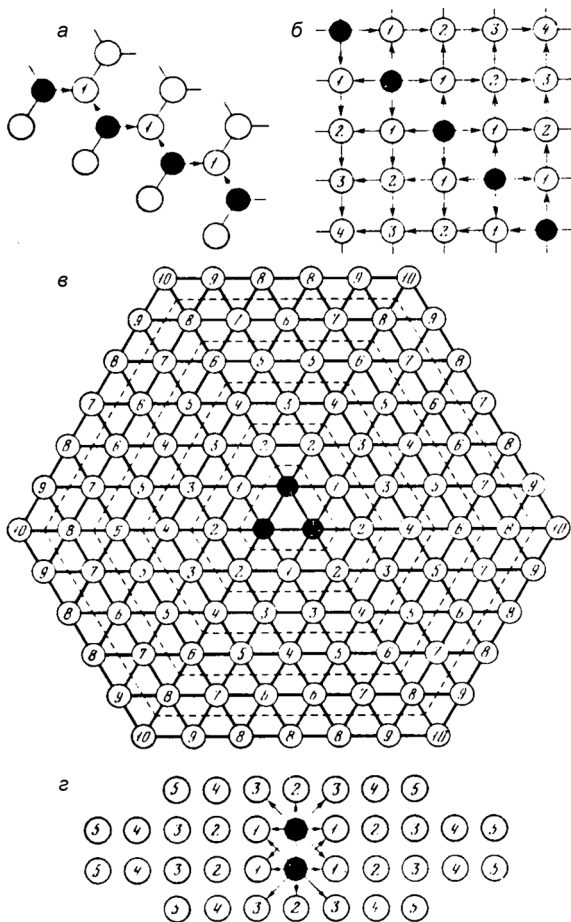


Рис. 4. Формы распространения возбуждения при пороге $\aleph = 2$ [12]: вырождение возбуждения в N_3^2 (а), N_4^2 (б); невырождающаяся волна в N_6^2 при $\theta = 2$ (в), в N_8^2 при $\theta = 1$ (г)

странение возбуждения называется вырождающимся при конечной траектории и невырождающимся – в противном случае [12, 14].

Если $\aleph \leq 1$, то для возбуждения любой покоящейся точки в $T(X)$ достаточно, чтобы возбудилась только одна из ее соседних точек. Если при этом граф ткани не содержит поглощающих вершин, т. е. таких, из которых нет выходящих ребер, то фундаментальное распространение из любой вершины $T(X)$ существует и является невырождающимся при неограниченном множестве X .

Если же $\aleph > 1$, то возникает необходимость изменения определения фундаментального распространения. Действительно, пусть порог $\aleph = 2$, т. е. произвольная покоящаяся точка x возбуждается в момент $\tau + 1$, если в предыдущий момент τ возбуждены, по меньшей мере, две ее соседние по связям точки. Очевидно, в этом случае возбуждение одиночной точки ткани не достаточно для создания распространяющейся волны возбуждения. Поэтому в общем случае $\aleph > 1$ фундаментальным называют такое распро-

странение, которое инициируется начальным возбуждением некоторого минимального множества точек $\Phi(x, 0)$, где $|\Phi(x, 0)| > 1$ [12].

В сети N_3^2 можно так выбрать две точки, чтобы в следующем такте при $\aleph = 2$ они возбудили еще одну точку. Однако здесь никакое большее начальное множество $\Phi(x, 0)$ не способно создать траекторию длительностью более одного такта (рис. 4, а).

В сети N_4^2 и при $\aleph = 2$ начальное возбуждение пары диагональных точек тоже приводит к распространению только на один шаг, но возбуждение k диагональных точек, принадлежащих одной прямой, вызывает вырождающееся распространение длительностью $\tau = k - 1$ (рис. 4, б). Увеличить длительность траектории в N_3^2 и N_4^2 невозможно и за счет увеличения длительности θ возбуждения каждой точки.

Сеть N_6^2 в этом отношении существенно отличается от предыдущих. При $\theta = 1$ картина распространения в N_6^2 сходна с описанной для N_4^2 . Однако, если $\theta = 2$, то от пары соседних точек возбуждение распространяется 2 такта, а при начальном возбуждении трех точек одного треугольника (рис. 4, в) последующая волна возбуждения не вырождается. Таким образом, в сети N_6^2 , совмещая эффекты пространственной и временной суммации воздействий, можно создать невырождающееся распространение возбуждения при $\aleph = 2$, однако сеть теряет это свойство при $\aleph = 3$ [12].

Сеть N_8^2 при $\aleph = 2$ и $\theta = 1$ позволяет создать невырождающееся распространение без использования временной суммации начальным возбуждением двух соседних точек. При выбранных на-

чальных условиях диагональная пара точек этим свойством не обладает, а простая пара соседних точек обладает. В последнем случае и при $N = 2$ фронт имеет устойчивую форму: состоит из двух фронтов, содержащих по 4 точки (рис. 4, з). Этот случай характерен для создания в однородной изотропной среде неизотропной формы распространения возбуждения [12].

Заключение. Для понимания функциональной организации технологических сред, моделируемых дискретными точечными тканями, требуется определить необходимые и достаточные условия невырожденного распространения, инициированного начальным возбуждением точек, со своей конфигурацией связей, с последующим определением топологии траектории фронта волны возбуждения при тех же начальных условиях. Начальные условия при высокоинтенсивной обработке в процессах послойного синтеза определяются источниками энергии, подачей материала, их мощностью, расходом и распределением в пространстве и во времени.

В рассматриваемой континуальной модели точечной ткани каждая точка-клетка не отличается по свойствам от клеток дискретной модели и может находиться в одном из трех состояний: покоя, возбуждения и рефрактивности. В результате волны возбуждения ткани могут быть описаны с применением классических волновых принципов распространения интенсивных воздействий в технологической среде, что позволяет эффективно моделировать изменение и передачу состояния, структур и свойств материала.

Такой подход дает возможность с позиций теории распределенных систем представить технологический барьер как границу распространения в материале воздействий высокоинтенсивными физическими полями в результате вырождения распространения фронта волны возбуждения. Для определения фронта волны требуется знать необходимые и достаточные условия невырожденного распространения и топологию связей фронта волны возбуждения.

Литература

1. Васильев А. С., Дальский А. М., Клименко С. А. и др. Технологические основы управления качеством машин. М., 2003.
2. Дальский А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. М., 1975.
3. Яцерицын П. И., Рыжов Э. В., Аверченков В. И. Технологическая наследственность в машиностроении. Мн., 1977.
4. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин / Под общ. ред. П. А. Витязя. Мн., 2010.
5. Хейфец М. Л., Кожуро Л. М., Мрочек Ж. А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. Гомель, 1999.
6. Хейфец М. Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. М., 2005.
7. Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж., Оксогоев А. А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М., 1994.
8. Гордиенко А. И., Хейфец М. Л., Чемисов Б. П. и др. Синергетические аспекты физико-химических методов обработки. Мн., 2000.
9. Циглер Г. Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механики сплошной среды. М., 1966.
10. Бахарева И. Ф. Нелинейная неравновесная термодинамика. Саратов, 1976.
11. Дружинин В. В., Конторов Д. С. Проблемы системологии. М., 1976.
12. Смолянинов В. В. Математические модели биологических тканей. М., 1980.
13. Балаховский И. С. // Проблемы кибернетики. 1961. № 5. С. 36–39.
14. Цетлин М. Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. М., 1969.
15. Чижик С. А., Хейфец М. Л., Филатов С. А. // Механика машин, механизмов и материалов. 2014. № 4 (29). С. 68–74.

S. A. CHIZHIK, M. L. KHEIFETZ, S. A. FILATOV

TECHNOLOGICAL BARRIERS OF HIGH-INTENSIVE PRODUCTION AT THE PROCESSES OF LAMINATE SYNTHESIS AND TREATMENT OF MATERIALS

Summary

The technological methods of laminate synthesis with operated inheritance of characteristics of material, using the technological barriers in the processes of high-intensive treatment, are determined on basis of dominants characteristics of functional layers.