

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА
MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

УДК 621.01:536.75

Поступила в редакцию 28.02.2017

Received 28.02.2017

П. А. Витязь^{1,2}, М. Л. Хейфец^{1,3}, С. А. Чижик^{1,4}

¹Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

²Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

³ГНПО «Центр» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

⁴Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь

**«ИНДУСТРИЯ 4.0»: ОТ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫХ
И АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ К САМОВОСПРОИЗВЕДЕНИЮ МАШИН
И ОРГАНИЗМОВ**

Проведен анализ состояния и перспектив развития аддитивных технологий компьютеризированного производства, позволивший показать новую парадигму его эволюции – переход к самовоспроизведению машин и их частей, а также организмов.

Предложена диаграмма логических связей в процессах аддитивного производства, представляющая собой конечный автомат, которая может использоваться как для построения 3D-принтера, осуществляющего «выращивание» изделия сложной формы и структуры, так и для аддитивного синтеза его композиционного материала.

Рекомендован подход, который определяет аддитивные методы как синерготехнологии, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений. На основании подхода выбираются источники энергии и материала для технологий послойного синтеза изделий. Стабилизация толщины формируемых слоев связана с процессами самоорганизации поверхностных явлений и конструктивными особенностями изделий.

Ключевые слова: компьютеризированное производство, аддитивные технологии, самовоспроизведение машин, конечный автомат, клеточный автомат, послойный синтез, синерготехнологии, самоорганизация

P. A. Vitiaz^{1,2}, M. L. Kheifetz^{1,3}, S. A. Chizhik^{1,4}

¹Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

²Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

³State Scientific and Production Association “Center” of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

⁴A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**“INDUSTRY 4.0”: FROM INFORMATION AND COMMUNICATION AND ADDITIVE
TECHNOLOGIES TO SELF-REPRODUCTION OF MACHINES AND ORGANISMS**

An analysis of the state and prospects of development of additive technologies for computer-aided manufacturing has been carried out. This analysis allowed demonstrating a new paradigm of computer-aided manufacturing evolution – the transition to self-reproduction of machines and their parts, as well as organisms.

A diagram of logical connections in the process of additive manufacturing has been proposed, which is a state machine that can be used to build a 3D printer enabling to “grow” products of complex shapes and structures, as well as for additive synthesis of its composite material.

Prospective approach, considering additive methods such as synergetic energy technology, ensuring the self-organization of surface phenomena in the formation of structures of layers of different materials has been developed. It is proposed on the basis of the approach to choose sources of energy and material defining discrete or continuous technological environment of the additive processing method. Conditions for stabilization of the thickness of formed layers associated with processes of self-organization of surface phenomena and design features of products have been discussed.

Keywords: computerized production, additive technologies, self-reproduction machines, finishing machine, cellular automaton, layered synthesis, synergetic technologies, self-organizing

Машинные аналоги живого организма всегда соответствуют духу времени, это подчеркивали Н. Винер, К.-Э. Шеннон и другие известные ученые [1, 2].

В качестве организма или идеализированной машины, а также их частей на протяжении длительного времени, в том числе и на современном этапе, выступает автомат. Теория автоматов изучает не их внутреннее устройство, а особенности внешних проявлений [3, 4].

Элементы организма или машины рассматриваются как автоматы, чья внутренняя структура не обязательно должна быть открыта, но которые предполагаются реагирующими на отдельные определенные раздражители определенным образом [4].

Конечные автоматы и модели самовоспроизведения. «Черный ящик», имеющий конечное число дискретных внутренних состояний, называется *конечным автоматом*. Обычно автомат имеет также конечное число возможных входных и выходных сигналов, а его состояние и выходной сигнал в любой момент времени зависят от состояния и входного сигнала в предыдущий момент времени [5].

В терминах логики автомат, который смог бы выполнять точно задаваемые операции, попытался определить А.-М. Тьюринг. Машина Тьюринга представляет собой «конечный автомат», снабженный «бесконечной лентой» с инструкцией, записанной на ее конечном участке [1, 4].

Несмотря на то что биологические системы состоят из малонадежных компонентов, они высоконадежны и способны к самовосстановлению. Д. фон Нейман показал, как сделать машину, которая функционировала бы должным образом, даже если некоторые ее части выйдут из строя. Это обеспечивается за счет введения в машину избыточности или резервирования, например путем замены как одной схемы, так и ее элементов несколькими, включенными параллельно [4, 5]. В результате он предположил, что наипростейшее из возможных описание операций, свойственных мозгу, может быть выполнено в виде **диаграммы**, отражающей все возможные его связи.

Фон Нейман первым рассмотрел методы создания *самовоспроизводящих машин*. Он показал, что если машину снабдить соответствующей программой действий и поместить в *среду* – «кладовую», состоящую из таких же деталей, что и сама машина, то, отыскивая необходимые детали, она обеспечит самовоспроизведение [1, 4].

В своей *модели самовоспроизведения* фон Нейман продемонстрировал, как в условиях простого окружения с большим числом не очень разнообразных деталей или с малым числом состояний создать достаточно сложную машину. Он пришел к выводу, что команды, которые сообщают машине, как построить саму себя, из логических противоречий не могут быть полными. Команды должны описывать не только автомат, но и самих себя, а в результате должен существовать план построения плана построения машины и т. д. Этого можно избежать, если иметь две машины, каждая из которых по-своему обращается с планом построения [1, 4].

Далее Д. фон Нейман обратился к абстрактной математической модели чисто логического характера. В качестве «кладовой» он выбрал среду в виде плоскости, разделенной на квадратные *клетки*. В каждую такую клетку фон Нейман поместил одну из элементарных составляющих – машину с конечным числом состояний. Такие машины не имеют ни входов, ни выходов, а обладают лишь некоторым числом допустимых состояний. Каждая машина является детерминированной и синхронной, а состояние каждой клетки зависит от состояния ее самой и соседних с ней клеток в предыдущий момент времени [1, 4]. Подобная система, состоящая из мозаичного пространства, **клеточных машин**, допустимых состояний, правил перехода, называется *мозаичной структурой*. В свою очередь *конфигурацией* в структуре именуют конечный блок из клеток, состояния которых заданы.

В пределах среды находятся **конфигурации из клеток** (квадратных или других по форме сотовых структур), и именно их можно сделать самовоспроизводящимися. Клетки, находящиеся в состоянии покоя, являются сырьем, при этом клетка, отделенная от целой конфигурации, не может внезапно активизироваться. Машина «дотягивается» до окружающего сырья только через локальные действия. В результате все сводится к построению мозаичной структуры из отдельных клеток с небольшим числом различных состояний, а также выбору **правил перехода** и последующей организации этих клеток в конфигурации, которые смогут воспроизводить себе подобных. Решение таких задач сходно с составлением компьютерных программ [4, 6].

Для их решения Д. фон Нейман потребовал, чтобы каждая конфигурация включала в себя универсальную машину Тьюринга. На этой основе он разработал детали для самовоспроизводящейся конфигурации, состоящей из множества (примерно 200 тыс.) клеток с большим, но ограниченным числом (им рассмотрено 29) допустимых состояний [4, 6].

Таким образом, самовоспроизведение машин можно рассматривать с позиций компьютеризации производственной деятельности, а 3D-принтеры, печатающие машины, их узлы и детали проектировать как устройства компьютерной периферии, построенные по той же архитектуре, что и ЭВМ.

Поэтому для моделирования 3D-печати прежде всего необходимо:

1) предложить **диаграмму** связей в процессах «выращивания» изделий, представляющую собой *конечный автомат*;

2) трансформировать в **клеточную машину** с ограниченным числом *состояний и правил перехода* предложенный конечный автомат;

3) сформировать **конфигурации из клеток** конечного блока *клеточных машин* для различных процессов «выращивания» изделий;

4) рассмотреть *мозаичные структуры*, формируемые различными конфигурациями клеток, в зависимости от их состояний и **правил перехода**.

Компьютеризация производства и кастомизация¹ изделий. Повышению эффективности производственной деятельности служит создание комплексов технологических, транспортных, энергетических и информационных машин на основе новых технологий и повышения производительности уже используемых. Такая совокупность производящих машин получила название технологических комплексов (ТК), которые автономно функционируют и в установленных пределах значений с использованием программного управления обеспечивают требуемые характеристики качества изделий [7, 8].

Технологические комплексы в своем развитии [9, 10] прошли ряд этапов (рис. 1).

Началом первого этапа можно обозначить автоматизацию 1970-х годов на основе числового программного управления. По сравнению с универсальным станочным оборудованием производство начала XXI в. с приходом на рабочие места персональных компьютеров использует компоненты искусственного интеллекта и позволяет повысить эффективность оборудования в десятки раз при обеспечении все более возрастающих требований к качеству продукции [10].

С середины 1980-х годов наметился переход от обрабатывающих центров к гибким производственным системам с элементами интеллектуального производства [9]. Развитие средств микроэлектроники явилось базой для создания мехатронных систем, которые включают как электро-механическую часть, так и электронно-управляющую (построенную на основе использования компьютеров или микропроцессоров). Мехатронные системы обеспечивают синергетическое объединение узлов точной механики с электротехническими, электронными и компьютерными компонентами с целью проектирования и производства качественно новых установок, модулей, систем и комплексов машин с интеллектуальным управлением их функциями [7, 8].

Новые этапы развития гибкой автоматизации производственных систем (см. рис. 1) связаны прежде всего с предельной концентрацией средств производства и управления, а также с сокращением сроков конструирования, проектирования, технологической подготовки и изготовления изделий [10]. В результате мехатронные технологические комплексы объединяются в компактное интеллектуальное производство (*CIM – Compact Intelligent Manufacture*), базирующееся на сочетании интенсивных, в том числе и аддитивных, технологий, прогрессивного технологического оборудования и интегрированной системы управления [11, 12].

Современный уровень развития информационных технологий в промышленности обеспечивает переход к использованию технологий создания, поддержки и применения единого информационного пространства во времени на всех этапах жизненного цикла продукции: от ее проектирования до эксплуатации и утилизации, то есть к CALS-технологиям (*Continuous Acquisition and Life-cycle Support*) [11].

¹ Кастомизация – это подгонка (адаптирование) продукции, товара для определенного потребителя с учетом его интересов и требований.

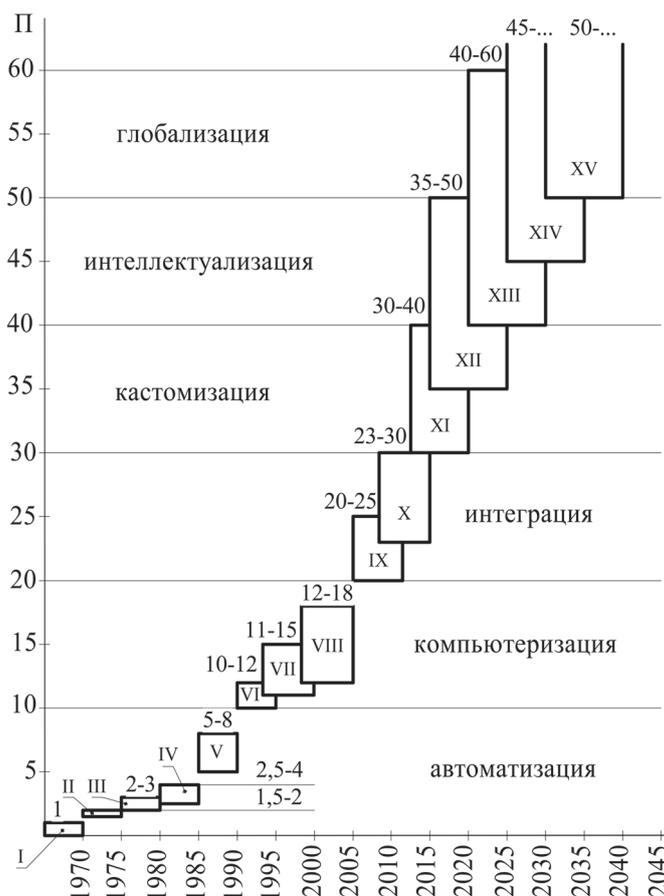


Рис. 1. Этапы развития технологических комплексов, с производительностью (П): I – универсальное оборудование с производительностью, принятой за 1, II – оборудование с числовым программным управлением, III – робототехнические комплексы, IV – обрабатывающие центры, V – гибкие производственные системы, VI – компьютерно-управляемое производство, VII – мехатронные технологические комплексы, VIII – компактное интеллектуальное производство, IX – компьютерное сопровождение жизненного цикла изделий, X – виртуальные предприятия, XI – аддитивное производство, XII – интернет вещей, XIII – машинное обучение, XIV – искусственный интеллект, XV – синергия технологий

Fig. 1. Stages of development of technological complexes P – productivity of equipment, increasing with time: I – the universal equipment with the productivity accepted for 1, II – equipment with numerical program control, III – robotic complexes, IV – machining centers, V – flexible production systems, VI – computer-controlled production, VII – mechatronic technological complexes, VIII – compact intellectual production, IX – computer support of the life cycle of products, X – virtual enterprises, XI – additive production, XII – Internet of things, XIII – machine learning, XIV – artificial intelligence, XV – synergy of technologies

Единое информационное пространство позволяет интегрироваться разрозненным комплексам компактного производства в виртуальное предприятие, создаваемое из различных пространственно удаленных подразделений, которые обладают единой информационной ERP-системой (*Enterprise Resource Planning*) для использования компьютерной поддержки этапов жизненного цикла продукции [12].

Проведенный анализ возрастающей эффективности технологических комплексов показал, что после этапов пространственно-временной интеграции производственных процессов и жизненного цикла изделий последуют этапы, обеспечивающие компактность производства на основе технологий аддитивного производства (*AM – Additive Manufacturing*). Аддитивные технологии синтеза композиционного материала и формообразования изделия обеспечивают высокую эффективность за счет сокращения длительности и количества производственно-технологических этапов жизненного цикла изделий [13, 14].

Для производства и адресной поставки кастомизированного изделия, с учетом внешней и внутренней логистики предприятия (в том числе и виртуального), можно дополнить проходя-

щие этапы прогнозом на будущее, которое часто связывается с новой парадигмой производства, называемой «Индустрия 4.0». Данный термин предложен немецкими компаниями на Ганноверской выставке технологий в 2011 г. для обозначения начала «эпохи четвертой индустриальной революции», связанной с промышленным интернетом вещей (*IIoT – Industrial Internet of Things*). В настоящее время зарождается новая эпоха производства – массовая кастомизация, характеризующаяся тем, что потребитель выступает в качестве дизайнера и инженера. Теперь по запросам потребителя можно непосредственно контролировать и управлять, а также изменять производственный процесс [15, 16]. В результате при системном анализе роста эффективности технологических комплексов (см. рис. 1) необходимо рассчитывать не только удельную технологическую трудоемкость (себестоимость), приходящуюся на одно изделие, но и затраты по всему жизненному циклу изделия, особенно связанные с его кастомизированным маркетингом, проектированием, эксплуатацией, утилизацией и сокращением всевозможных логистических поставок.

В основе зарождающихся этапов новой эпохи лежит массовая компьютеризация и глобализация Интернета, предсказанная еще в 1980-х годах Р. Курцвейлом (в настоящее время технический директор *Google*). Дальнейшее развитие производства аналитики связывают с машинным обучением (*ML – Machine Learning*) и искусственным интеллектом (*AI – Artificial Intelligence*). Сочетание робототехники и 3D-печати на основе машинного обучения с интернетом вещей в глобальной сети и искусственным интеллектом уже сегодня дают возможность создавать полностью автоматизированные фабрики [16].

Совместное действие различных «цифровых технологий» за счет синергетических эффектов позволяет резко повысить эффективность производства, полностью реструктуризировать предприятия и создавать на них продукцию, которой до этого не было.

Одновременно с эволюцией производственных технологий идет прогресс биотехнологий и медицинских технологий. По прогнозам Р. Курцвейла, зачастую просто фантастическим, в 2025 г. носимая человеком электроника начнет замещаться имплантатами, и уже в 2030-х годах 3D-принтеры будут печатать новые органы, а к 2040-м нанороботы ремонтировать организм на клеточном уровне. Он предполагает, что к 2035 г. люди станут «киборгами», напичканными множеством электронных имплантов, а к 2045 г. вся планета превратится в одну интернет-вещь, представляющую собой большой компьютер, использующий весь людской интеллект, и актуальным станет вопрос о человеческом бессмертии [16].

Аддитивные технологии компьютеризированного производства. Современные аддитивные технологии реализуют провозглашенную в 1959 г. Р. Фейнманом новую парадигму производства «снизу вверх» взамен или в дополнение развивающейся веками парадигме «сверху вниз».

Сущность аддитивного производства заключается в послойном синтезе или «выращивании» изделий по «цифровым моделям» без использования формообразующей оснастки. Создание формы изделия происходит путем добавления материала, в отличие от традиционных технологий, основанных на удалении «лишнего» материала [17].

Различают две основные группы аддитивных методов: 1) с «предварительным формированием слоя» материала по технологиям *BD (Bed Deposition)*, подразумевающим наличие определенной платформы, на которой послойно «выращивается» материал и изделие; 2) «непосредственное осаждение слоя» материала на сложнопрофильную поверхность изделия по технологиям *DD (Direct Deposition)* [18].

В настоящее время методы аддитивного производства классифицируются следующим образом по стандарту ISO/ASTM 52900-15 (ASTM F2792-12a) [13]:

1. *Vat Photopolymerization* – фотополимеризация в емкости;
2. *Material Jetting* – разбрызгивание материала или струйные технологии;
3. *Material Extrusion* – выдавливание материала;
4. *Powder Bed Fusion* – плавление материала в заранее сформированном слое;
5. *Binder Jetting* – разбрызгивание связующего вещества;
6. *Sheet Lamination* – соединение листовых материалов;
7. *Directed Energy Deposition* – прямой подвод энергии непосредственно в место построения.

Классификации по принципам получения изделий без формообразующей оснастки соответствуют, согласно представленной последовательности, созданные уже более 30 лет назад «традиционные» методы [19, 20]:

1. *Stereolithography Application (SLA)* – стереолитография;
2. *Solid Ground Curing (SGC)* – послойное уплотнение материала;
3. *Fused Deposition Modeling (FDM)* – послойное экструдирование расплава;
4. *Selective Laser Sintering (SLS)* – селективное лазерное спекание;
5. *Direct Shell Part Creation (DSPC)* – прямое создание литейных форм;
6. *Laminated Object Manufacturing (LOM)* – послойное ламинирование из листового материала; а также другие методы, сегодня не столь распространенные в производстве.

Широко используемые в мировом производстве технологии послойного синтеза позволяют заключить, что наиболее перспективно применение новых аддитивных технологий создания слоев и формообразования изделий, использующих различные сочетания материалов и источников энергии. Это в свою очередь ставит задачи распределения компонентов материалов и потоков энергии не только по заданному контуру или поверхности, но и по глубине от поверхности изделия, а также по характеру импульсов подачи энергии и материала.

Таким образом, при проектировании технологии аддитивного синтеза применяются как методы формообразования деталей из композиционных материалов, использующие потоки энергии и компонентов материала, так и методы автоматизации и управления процессами оперативного макетирования и производства изделий.

Моделирование технологий аддитивного производства. Для обозначения процессов аддитивного производства изделий в технологической системе традиционно используют понятия [21, 22]: прямое получение изделий сложной формы – «выращивание» (*Solid Freeform Fabrication*); послойный синтез – «ламинирование» (*Laminate Synthesis*); быстрое макетирование – «прототипирование» (*Rapid Prototyping*); формирование трехмерных объектов – «3D-печать» (*3D Component Forming*). В последнее время эти понятия зачастую связывают с аддитивными методами: «непосредственного создания слоя» (*DD*-технологии) и «предварительного формирования слоя» (*BD*-технологии), а также «промежуточного» и «окончательного» синтеза материала изделия. Поэтому встает вопрос об определении взаимосвязи процессов формообразования изделий и разграничения используемых понятий.

Для самовоспроизведения объектов, согласно модели фон Неймана [4], требуются машины: C – «копировщица плана построения»; O – «исполнительница плана построения»; S – «пусковое устройство» (включает C и O в надлежащее время); B_{C+O+S} – «план построения автомата» (описывает все элементы модели). В результате весь автомат выражается символически $C+O+S+B_{C+O+S}$. После начального запуска S получает в свое распоряжение план построения автомата в целом B_{C+O+S} , C копирует его, а O в свою очередь следует ему для построения C , O и S .

Таким образом, можно представить [22, 23]:

- запуск (S) как прямой доступ к потокам вещества и энергии;
- получение плана (B_{C+O+S}) как самонастройку программы воспроизведения;
- копирование плана (C) как трансляцию информационного потока;
- построение автомата (O) как самоорганизацию его структуры.

Исследование процессов аддитивного производства в зависимости от агрегатного состояния исходного материала, размерности потоков формообразующей среды и последовательности технологических операций [24, 25] позволило представить совокупность процессов «выращивания» изделий в виде диаграммы логических связей (рис. 2).

Диаграмма представляет собой направленный замкнутый граф и описывает автомат с конечным числом состояний [21, 23]. Вершины графа изображают процессы аддитивного производства изделий и представляют логические операции: трансляцию информации, потоков вещества и энергии, запуск и остановку автоматического цикла.

Ребра графа отражают изменения состояний (1–6 и 1', 2', 4') материала технологической среды, а маршруты предусматривают различные комбинации изменений в зависимости от выбора начального процесса и порядка выполнения последующих процессов.

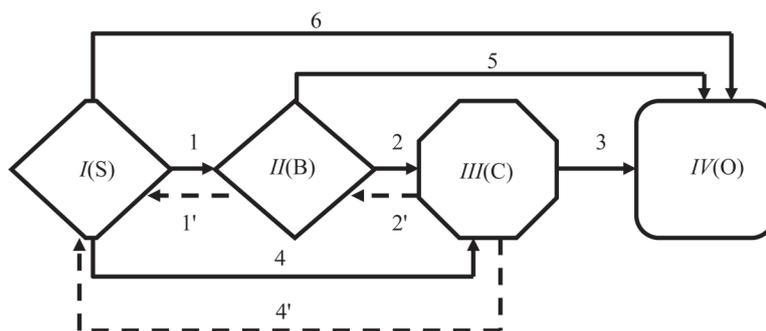


Рис. 2. Диаграмма логических связей, отражающая процессы аддитивного производства изделий
 Fig. 2. The diagram of logical connections, reflecting the processes of additive production of products

Так, различные варианты технологических маршрутов имеют вид последовательностей при выборе в качестве начального процесса (см. рис. 2):

- I) прямого получения деталей: 1→2→3; 4→3; 1→5; 4→2'→5; 6;
- II) послойного синтеза: 1'→4→3; 2→3; 1'→6; 2→4'→6; 5;
- III) быстрого прототипирования: 2'→1'→6; 4'→6; 2'→5; 4'→1→5; 3.

Рассматривая замену в модели самовоспроизведения процессов (прямого доступа к потокам вещества и энергии, самонастройки программы воспроизведения, трансляции информационного потока, самоорганизации структуры автомата) обеспечивающими их элементами технологической системы (деталью, инструментом, приспособлением, станком), приходим к выводу, что невозможно при использовании формообразующей оснастки создать конечный автомат, так как для изготовления детали должна существовать оснастка, а в свою очередь для ее создания необходимо также изготовить оснастку и т. д. [21, 22].

Таким образом, алгоритмы [22, 23], предложенные согласно модели самовоспроизведения фон Неймана [4], позволяют описывать аддитивные технологии производства изделий без формообразующей оснастки, а обратные им последовательности – технологии, использующие оснастку, не представимы в качестве конечного автомата.

Описание в соответствии с существующими терминами процессов аддитивного производства алгоритмами по предложенной диаграмме логических связей предоставляет возможность анализировать существующие и разрабатывать новые методы прямого «выращивания» изделий.

Аддитивные синерготехнологии послойного синтеза изделий. Передовые технологии, помимо используемых новых аппаратных и программных средств, оборудования и оснащения, основываются на *послойном «выращивании» поверхностей* изделий и *самоорганизации структур* композиционного материала [23, 25]. Так, определяя фундамент наукоемких нанотехнологий, Ж. И. Алферов выделяет кроме зондовой микроскопии эпитаксиальный *рост пленок на поверхности* и процессы *самосборки гетероструктур* материала [26].

Кроме того, в *синергетической концепции* заложено ограничение числа состояний и правил их перехода в технологической системе [27]. Определение доминирующих процессов структурообразования при интенсивных воздействиях целесообразно проводить с использованием понятия моды в распределениях непрерывной случайной величины контролируемого параметра [24]. Под модой понимают такое значение параметра, при котором плотность его распределения имеет максимум.

Согласно синергетической концепции устойчивые моды подстраиваются под доминирующие неустойчивые моды и в результате могут быть исключены. Это приводит к резкому сокращению числа контролируемых параметров, а оставшиеся неустойчивые моды могут служить в качестве параметров порядка, определяющих процессы структурообразования [23].

Поэтому особенно перспективен подход, рассматривающий аддитивные методы как *синерготехнологии*, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений при послойном формировании структур поверхностных слоев различных материалов и управление их свойствами при разнообразных физических воздействиях [17, 18].

Самоорганизация поверхностных явлений обеспечивает устойчивое образование слоя определенной толщины при значительных изменениях расстояния от источника энергии или подаваемого материала до формируемой поверхности, а также позволяет в результате взаимопроникновения сращивать последовательно наносимые слои [27].

Расстояние до формируемой поверхности – особо чувствительный фактор при «непосредственном осаждении слоя» по *DD*-технологиям, а изменение расстояния особенно важно для стабилизации толщины при «предварительном формировании слоя» материала по *BD*-технологиям, подразумевающим наличие некоторой платформы, на которой послойно создается материал и изделие.

В результате выбор в аддитивной технологии источника энергии или подаваемого материала определяет не только технологическую среду, представляемую дискретной или непрерывной, но и поверхностные явления, обеспечивающие процессы самоорганизации в синерготехнологиях [27].

Прямое «выращивание» изделий послойным синтезом материала возможно в различных агрегатных состояниях – твердом, жидком, газообразном, а также в разнообразных высокоэнергетических процессах [23] с объемной, множеством локализованных и единой сфокусированной зонами поглощения [27, 28] в зависимости от плотности мощности потоков энергии (таблица).

Высокоэнергетические процессы послойного синтеза изделий
High-energy processes of layered synthesis of products

Процессы разделения и формирования слоев	Агрегатное состояние наносимого материала	Зоны поглощения и плотность потоков энергии, Вт/см ²	Толщина разделяемого и формируемого слоя, мм
Индукционный нагрев с припеканием порошка и наплавка погружением	Твердое (порошок)	Множество локализованных, $10^2 \dots 10^4$	0,3...3,0 [29, 30]
	Жидкое (расплав)	Объемная, $10^2 \dots 10^4$	
Плазменная резка, напыление и наплавка порошка	Твердое (порошок)	Объемная, $5 \cdot 10^2 \dots 10^5$	0,1...10,0 [31]
Электроэрозионная обработка и электромагнитная наплавка порошка	Твердое (порошок)	Множество локализованных, $10^3 \dots 10^5$	0,05...0,50 [32]
Лазерная резка, поверхностное оплавление и легирование	Жидкое (расплав)	Единая сфокусированная, $5 \cdot 10^3 \dots 10^7$	1...10 (при термоэлектрической конвекции 0,01...1,0) [33]
Электронно-лучевая резка, поверхностное оплавление и модифицирование	Жидкое (расплав)	Единая сфокусированная, $10^3 \dots 10^6$	1...10 (при термоэлектрической конвекции 0,01...1,0) [33]
Ионная имплантация и осаждение	Газообразное	Множество локализованных, $10^3 \dots 10^5$	0,002...0,20 [34]

В процессе индукционного нагрева с припеканием порошка [29], а также наплавки погружением детали в расплавленный металл множество локализованных или объемная зоны поглощения энергии распределены по всей наращиваемой поверхности [30]. Толщина формируемого слоя определяется адгезией между расплавом и поверхностью изделия. Она описывается скоростью подъема детали, напряжением поверхностного натяжения и коэффициентом внутреннего трения. Максимальная толщина слоя при обтекании расплавом поверхности ограничивается условиями потенциального течения и рассчитывается как толщина пограничного слоя, за пределами которого происходит срыв потока [23].

При плазменной резке, напылении и наплавке металлических порошков в твердом состоянии в плазменных процессах образуется объемная зона поглощения энергии [31]. Толщина формируемого слоя определяется совместным действием кинетического и термодинамического факторов, описываемых скоростью движения частиц порошка и термодинамическим потенциалом плазменного потока, а процесс формирования слоя характеризуется соотношением между кинетической и джоулевой энергией потока.

В процессах электроэрозионной обработки поверхности и электромагнитной наплавки порошка образуется множество локализованных зон поглощения энергии. Электромагнитная на-

плавка позволяет наносить покрытие не более определенной толщины, после чего формируемый слой теряет устойчивость, а на поверхности образуются пики, которые при последующих разрядах превращаются в кратеры [32]. Управлять процессом наплавки позволяют электромагнитные потоки. Так, движения и фиксация частиц ферропорошка задаются индукцией магнитного поля, а интенсивное тепловыделение в местах контакта с формируемой поверхностью и плавление порошка определяются напряженностью электрического поля. В результате роста сопротивления ферропорошковой среды и электропроводности наносимого покрытия стабилизируется толщина наносимого слоя [27]. Процесс электромагнитной наплавки определяется электромагнитными и инерционными силами и описывается магнитным взаимодействием частиц и напряженностью электрического поля в рабочей зоне.

При лазерной резке, оплавлении и легировании поверхностного слоя целесообразно рассматривать единую сфокусированную зону поглощения энергии, сканируемую по всей формируемой поверхности [27]. При лучевой обработке в результате конвекционной неустойчивости в узком поверхностном слое расплава определенной толщины формируются состоящие из вихрей диссипативные структуры. При достаточно быстром охлаждении в таком состоянии по фронту кристаллизации образуется ячеистая структура. Толщина измененного слоя описывается соотношением свойств металла, его коэффициентами поверхностного натяжения и объемного расширения, плотностью в расплавленном состоянии [33].

В процессах электронно-лучевой резки, при оплавлении и модифицировании поверхностного слоя целесообразно рассматривать единую сфокусированную зону поглощения энергии. В процессе кристаллизации материала в ванне расплава также образуется ячеистая структура [27]. Процесс формирования диссипативных структур в расплаве определяется проявлением термокапиллярных явлений и связан с подъемной силой плавучести и силой диссипации в расплаве [33, 34].

При ионной имплантации и осаждении покрытия из газообразного состояния поток ионов, не фокусируясь, распределяется по поверхности детали, формируя множество локализованных зон поглощения энергии. Толщина наносимого покрытия определяется в основном толщиной слоя, в котором потенциал, прикладываемый к детали, эффективно воздействует на ионы [32]. Этот слой описывается соотношением величины потенциала электрического поля и плотности ионов плазмы с учетом их заряда и массы. Ионы в результате совместного влияния их потенциальной энергии в электрическом поле и тепловой энергии плазменного потока распределяются по экспоненциальному закону, задавая тем самым толщину осаждаемого покрытия [34].

Рассмотренные высокоэнергетические процессы дают возможность послойно наносить материалы с особыми свойствами на поверхности изделий геометрически сложной формы. Это позволяет направленно изменять физико-механические свойства материала поверхности в зависимости от требований к эксплуатации деталей в машине [27, 34].

Формирование поверхностного слоя сложного профиля. Высокоэнергетические процессы аддитивных технологий рассматриваются с системных позиций, как последовательности преобразований энергии, вещества и энтропии в материальных и информационных подсистемах, направленные на изменение точности и рельефа поверхностей и физико-механических свойств материала изделия [35].

Для анализа путей формирования структур и фаз поверхностных слоев деталей в обрабатывающей системе выделяются нестабильные переменные (температура, давление, сила тока, магнитная индукция и др.), которые подчиняют себе развитие, эволюцию стабильных в данном процессе параметров. Такой подход позволяет рассматривать любую структуру как самостабилизирующийся энергетической обусловленностью комплекс [27, 35]. При его эволюции чередование переходов системы из устойчивого в неустойчивое состояние сопровождается сменой масштабного уровня процесса поглощения энергии и образованием диссипативных структур [27, 34].

Поверхности раздела структур и градиенты свойств слоев при аддитивных синерготехнологиях, формирующих композиционный материал изделия, определяются технологическими барьерами, которые дают возможность установить граничные условия процессов послойного синтеза [36].

Условия создания слоя в высокоинтенсивных процессах целесообразно связать с особенностями конструирования формируемых оболочек изделия. Конфигурацию границ позволяет рассмотреть компьютерное поверхностное и твердотельное моделирование. При этом задачи моделирования послойно формируемых оболочек не сводятся к простому масштабированию, а учитывают конструктивные особенности и специфические условия технологий, связанные с устойчивостью процессов, взаимопроникновением слоев и другими поверхностными явлениями [6, 23].

При индукционной наплавке погружением происходит затекание внутренних полостей, а заполнение пор зависит от условий смачивания расплава [30]. В процессах плазменного напыления и наплавки происходит скругление кромок [31]. На наиболее выступающих участках при электромагнитной наплавке толщина наносимого слоя снижается [32]. Толщина измененного слоя при лазерном или электронно-лучевом оплавлении неоднородна и зависит от степени присутствия легирующих элементов вследствие концентрационного расслоения расплава в образующихся вихрях [33]. При ионном осаждении покрытий на выступах с малым радиусом при вершине вследствие увеличения потенциала слой наращивается наиболее интенсивно [34].

В результате условия создания слоя в высокоэнергетических процессах целесообразно связать с особенностями конструирования формируемых изделий. Для создания слоев стабилизированной толщины в физических полях следует обеспечивать устойчивость технологической системы при индукционной, плазменной, электромагнитной, лазерной, электронно-лучевой и ионной обработках поверхности.

Самоорганизация поверхностных явлений в технологической среде. Особое внимание в технологической системе при обработке следует обращать на технологическую среду, которая в процессах нанесения плоских слоев (по *BD*-технологиям) и формировании оболочек (по *DD*-технологиям) создается воздействиями концентрированных потоков энергии.

Из-за рельефа шероховатости на поверхности детали скорость движения потока *непрерывной технологической среды* изменяется. Поэтому существует пограничный слой, находящийся между потенциальным течением и поверхностью детали. Этот пограничный слой, называемый слоем Прандтля, не является безвихревым, так как в нем благодаря вязкости среды действует трение, обусловленное сопротивлением обтеканию в ламинарном течении [37]. В результате неравномерность толщины покрытия, формируемого в расплаве, определяется пограничным слоем Прандтля.

Если при ламинарном обтекании число Рейнольдса превышает критическое значение, то часть пограничного слоя отрывается. Это приводит к тому, что часть потока становится турбулентной и значительно возрастает сопротивление обтеканию.

В технологической системе ионно-плазменные, электронные и лучевые воздействия *дискретной технологической среды* не полностью поглощаются формируемыми поверхностными слоями. При этом рассеяние потоков не всегда связано с образованием диссипативных структур в поверхностных слоях, а часто обусловлено отражением, преломлением или другими явлениями отвода вещества и энергии из рабочей зоны [27].

В ионно-вакуумных процессах большая часть ионов плазмы бомбардирует катод, что приводит к испарению с его поверхности нейтральных и возбужденных атомов, которые в свою очередь ионизируются в вакуумной дуге и снова возвращаются на катод в виде ионов. Осуществляется так называемый процесс самогенерации плазмы [34]. Главным в этом процессе является то, что плазма вакуумной дуги представляет собой эффективный источник ионов материала катода.

Если на поверхности основы имеются выступы и углубления различной формы, то это приводит к искривлению траектории движения ионов и соответственно к тому, что количество ионов, попадающих на основу в единицу времени, неодинаково в разных ее местах. Как следствие, толщина наносимого покрытия будет разной и с увеличением потенциала неоднородность плотности ионов в плазме повышается. Область возникающих неоднородностей ограничивается в основном толщиной примыкающего к ней слоя Дебая, то есть слоя, в котором потенциал, прикладываемый к основе, эффективно воздействует на ионы [27, 34].

Следовательно, можно сделать вывод, что формирование ионных потоков, идущих к основе, происходит в основном в слое Дебая, толщина которого зависит от плотности ионов, их зарядов,

масс и энергии. Развитая поверхность основы, наличие на ней неровностей вызывают разнотолщинность наносимого покрытия, формирование в нем различных структур [27, 32]. Для снижения разнотолщинности покрытий необходимо стремиться к уменьшению толщины слоя Дебая, что достигается уменьшением прикладываемого к подложке потенциала либо увеличением плотности ионов.

Синтез композиционных материалов в аддитивных технологиях. Для изучения пространственно-временных результатов технологических воздействий при аддитивном синтезе композиционного материала следует рассматривать материал как распределенную систему с позиции общей теории систем [38]. Такой подход предполагает, что свойства системы определяются свойствами элементов, из которых она построена, и организацией взаимодействия этих элементов. Благодаря подходу становится возможным изучение роли локальных свойств элементов и оптимизация их связей в определении глобальных свойств системы.

Для описания свойств композиционного материала в первую очередь рассматривается распределенная система взаимодействующих элементов в структурно-фазовом масштабе технологической среды [38, 39]. Состояние и акты изменения состояния формируемого материала можно моделировать на дискретной однородной среде логических функций, относящихся к классу моделей «непрерывных сред» с дискретными модификациями, поскольку они удовлетворяют следующему основному принципу: функционально связными при изменении свойств являются только соседние клетки, которые при иллюстрации связей рационально обозначить точками [39].

Для выделения моделей тканей с локальными взаимодействиями точек – клеток используют название «точечная ткань», поскольку передача возбуждения здесь 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. Определение некоторого графа G означает задание возможных функциональных связей во 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 [39].

Диаграмма логических связей в процессах аддитивного производства представляет собой конечный автомат. Приняв за функциональные состояния технологической системы различные способы наращивания слоев, построим кинетическую схему конечного автомата при: I) прямом получении деталей; II) послойном синтезе; III) быстром прототипировании; IV) формировании трехмерных объектов (рис. 3).

Представив блок-схемами совокупности режимов для каждого функционального состояния, получаем алгоритмические схемы состояний технологической среды. После соединения алгоритмических схем состояний строим клеточную машину технологической среды при «выращивании» изделий (рис. 4).

Рассматривая взаимосвязи состояний конечного автомата, получим граф состояний клетки-элемента технологической среды (рис. 5).

Конфигурации клеточных машин, отражающие их потактовые возбуждения (рис. 6), представленные графами состояний клеточных автоматов технологической среды (см. рис. 5), описывают поведение элементов мозаичной структуры (см. рис. 4) при «выращивании» изделий.

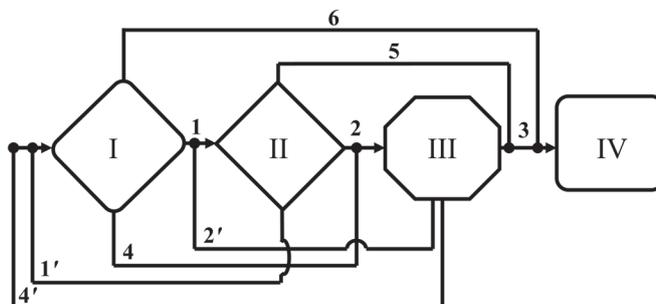


Рис. 3. Кинетическая схема функциональных состояний технологической системы

Fig. 3. Kinetic scheme of functional states of the technological system

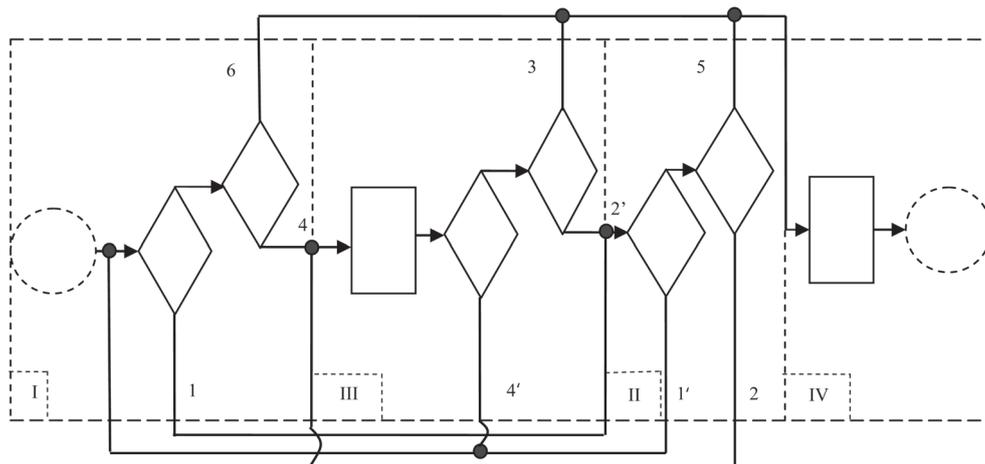


Рис. 4. Клеточная машина технологической среды

Fig. 4. Cell culture medium machine

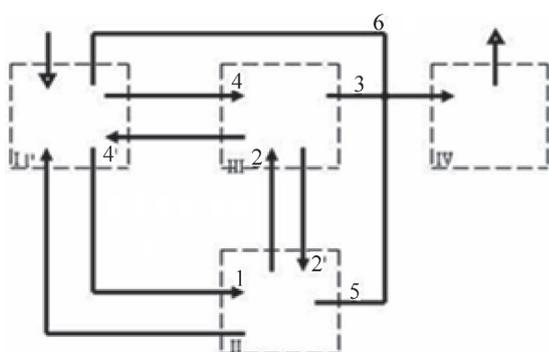


Рис. 5. Граф состояний клеточного автомата технологической среды

Fig. 5. The graph of the state of cell automaton of the technological medium

Рассмотренные конфигурации для «мозаичного пространства» состояний (см. рис. 6):

I – прямого получения деталей, главным образом будет представляться режимами с разбиением состояния покоя (рис. 6, c);

II – послойного синтеза, прежде всего будет описываться разбиениями состояний рефрактивности и возбуждения (рис. 6, b);

III – быстрого прототипирования, в первом приближении – общей упрощенной схемой (рис. 6, a).

В результате граф состояний автомата (см. рис. 4) может быть эффективно использован для описания функциональных состояний элементарных клеток технологической среды [36].

Трансформация клеточными автоматами структур материала. В общем случае «мозаичные» дискретные модели имеют структуру простых сетей N_s^n , а непрерывные модели определяются на непрерывных многообразиях типа действительного пространства с использованием топологических связей этого пространства [40]. Свойства каждой клетки – вершины $x \in X$ «мозаичной структуры» можно описывать некоторым множеством состояний $Z = \{z_1, \dots, z_m\}$ с указанием: графа переходов $P(Z)$ в этом множестве состояний; свойств переходов в P для разных воздействий на данную клетку x через внутренние или внешние связи; связи с текущим состоянием клетки x , состояний ребер-связей, выходящих из x .

Математическое содержание этих формальных отношений может широко варьироваться. При этом для описания процесса миграции одиночного акта смены состояний клеток можно использовать их представление в качестве конечных автоматов [36].

Процесс возбуждения клетки основывается на понятиях стимула и порога с выделением состояний (см. рис. 6): z_0 – покоя, z_+ – возбуждения, z_- – рефрактерности [40]. 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 $j_+ \geq \aleph$, то есть стимул должен превышать некоторый пороговый уровень \aleph , который будем сначала 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 рефрактивное 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 $z_+ \rightarrow z_+$, то есть 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. 6, a).

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. 6, b).

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. 6, c). 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 $\mathbf{z}(\tau) = \mathbf{e}_k$, то есть в этот момент только k -я компонента вектора \mathbf{z} равна 1, а остальные – нулю.

Смена состояний за один такт описывается линейным уравнением

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

с матрицей перехода $\mathbf{P} = \mathbf{P}(\tau)$, которая является функцией времени, что заложено в свойствах ее переменных элементов p и q . Эти элементы выражаются функцией единичного скачка, аргументом в котором является разность стимула и порога: $p = \varepsilon(j_+ - 1)$, $q = 1 - \varepsilon(j_+ - 1)$, то есть 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 $\mathbf{a}_+ = \mathbf{e}_1 + \dots + \mathbf{e}_{\theta_+}$, 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, то есть определения структурной модели пространства [40].

На основании описанной автоматной схемы возбуждения клетки можно определить стохастические модификации модели возбуждения, в которых вектор \mathbf{z} описывает распределение ве-

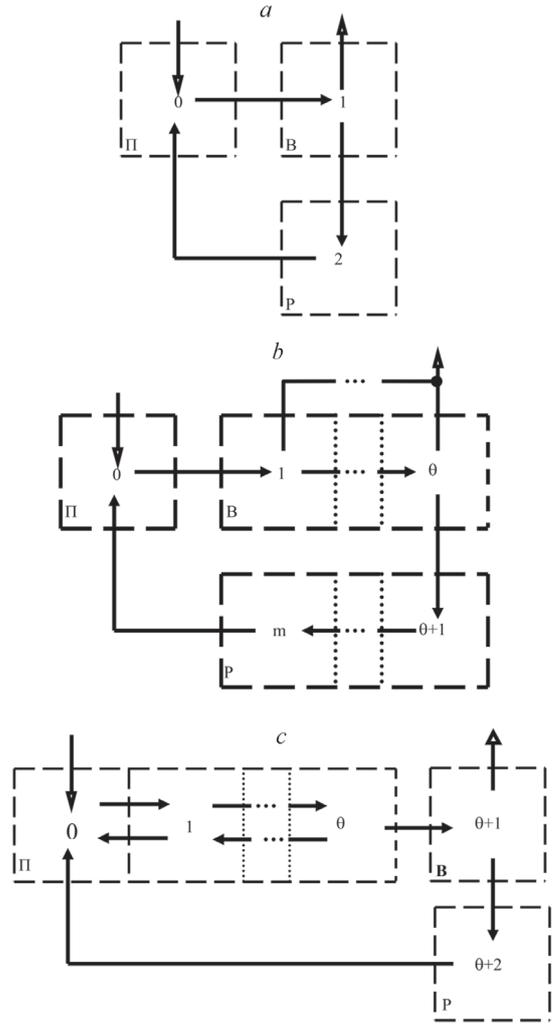


Рис. 6. Конфигурации клеточных машин, отражающие состояния покоя (Π), возбуждения (B), рефрактивности (P) возбудимых клеток-автоматов при упрощенной схеме (a), разбиении состояний возбуждения $\{1, \dots, \theta\}$ и рефрактивности $\{\theta+1, \dots, m\}$ на тактовые подсостояния (b) и разбиении состояния покоя $\{1, \dots, \theta\}$ на тактовые подсостояния (c)

Fig. 6. Configurations of cellular machines that reflect resting states (Π), excitation (B), refractivity (P) of excitable automata cells: with a simplified scheme (a), splitting the states of excitation $\{1, \dots, \theta\}$ and refractivity $\{\theta+1, \dots, m\}$ into clock sub-states (b) and partitioning the state of rest $\{1, \dots, \theta\}$ into clock substates (c)

роятностей нахождения клетки в каждом из состояний множества Z , а элементы матрицы \mathbf{P} представляют вероятности переходов между состояниями. Тогда p – вероятность перейти 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. Однако достаточно содержательной является модель с детерминированными длительностями θ_+ и θ_- , когда вероятностным образом определяется только переход $z_0 \rightarrow z_+$.

Движение фронта передачи свойств в мозаичном пространстве. Структура точечной ткани $T(X)$ мозаичного пространства на множестве клеток-вершин X задается матрицей связей, порядок которой равен $|X|$. Выделив подмножества X_0, X_+, X_- , отвечающие разным состояниям вершин, $X = X_0 \cup X_+ \cup X_-$, $X_0 \cap X_+ \cap X_- = \emptyset$, введем векторы-индикаторы этих подмножеств: $\mathbf{u}_0, \mathbf{u}_+, \mathbf{u}_-$ соответственно. 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 подмножества 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.

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 можно описать последующую миграцию возбуждения для произвольных начальных множеств $X_+(0)$.

Волна возбуждения $\mathbf{u}_+(\tau) = \mathbf{\varphi}(\tau)$ для $\tau \geq 0$ называется фундаментальной, если $X_+(0) = \{x_0\}$ – одиночная точка $x_0 \in X$ и $\mathbf{u}_+(\tau) \equiv \mathbf{0}$ для $\tau < 0$ [30]. Фундаментальная волна $\mathbf{\varphi}(\tau)$ 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 «оккупирует» в графе ткани $T(X)$ вершины одного порядка по отношению к начально возбужденной вершине x_0 , то есть фундаментальное множество $\Phi(x, \tau)$ есть множество вершин порядка τ .

Например, в однородных двумерных сетях N_s^2 для $s = 3, 4, 6, 8$ (рис. 7) вершины последовательных фундаментальных фронтов $\Phi(x, \tau)$ располагаются в соответствии с величинами периметров элементарных контуров.

В рассматриваемых дискретных моделях, в отличие от континуальных, воспроизводятся эффекты суммации воздействий, которые могут быть исследованы при оценке возможности распространения возбуждения в простых сетях при разных величинах порога покоя \aleph [36, 40].

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 момент $\tau = 0$ и $\tau_0 > 0$. Распространение возбуждения называется вырождающимся при конечной траектории и невырождающимся – в противном случае [40].

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, то есть 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 $\aleph = 2$, то есть 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 распространение, которое инициируется начальным возбуждением некоторого минимального множества точек $\Phi(x, 0)$, где $|\Phi(x, 0)| > 1$ [40].

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. 7, a).

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. 7, b). 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 два такта, а при начальном возбуждении трех точек одного треугольника (рис. 7, c) 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 $\aleph = 3$ [40].

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 начальных условиях диагональная пара точек этим свойством не обладает, а простая пара соседних точек – обладает. В последнем случае и при $\aleph = 2$ фронт имеет устойчивую форму: состоит из двух фронтов, содержащих по четыре точки (рис. 7, d). Этот случай характерен для создания в однородной изотропной среде неизотропной формы распространения возбуждения [40].

Таким образом, для понимания функциональной организации технологических сред, моделируемых дискретными точечными тканями в «мозаичном пространстве», требуется определить необходимые и достаточные условия невырожденного распространения, инициированного начальным возбуждением клеток – точек, со своей топологией связей, с последующим определением конфигурации фронта волны возбуждения [36, 40]. Начальные условия процесса возбуждения в аддитивных технологиях определяются мощностью, расходом и распределением в пространстве и во времени потоков энергии и подачи материала [23].

Заключение. Анализ современного состояния и перспектив развития аддитивных технологий компьютеризированного производства позволяет говорить о новой парадигме в его эволюции – «Индустрии 4.0», обозначающей переход к самовоспроизводству машин, в том числе в качестве частей организмов или самих организмов. В результате формируется и детализируется концепция «цифровой фабрики», в которой аддитивные технологии являются определяющим звеном системы, включающим развитые подсистемы: 3D-проектирования и управления производством и потреблением, начиная от моделирования изделия, его материалов и компонентов в соответствии с новыми технологическими возможностями и заканчивая получением и эксплуатацией функционально ориентированного кастомизированного изделия.

Предложена единая диаграмма логических связей в процессах аддитивного производства изделий, представляющая собой конечный автомат, и показано, что она может использоваться как

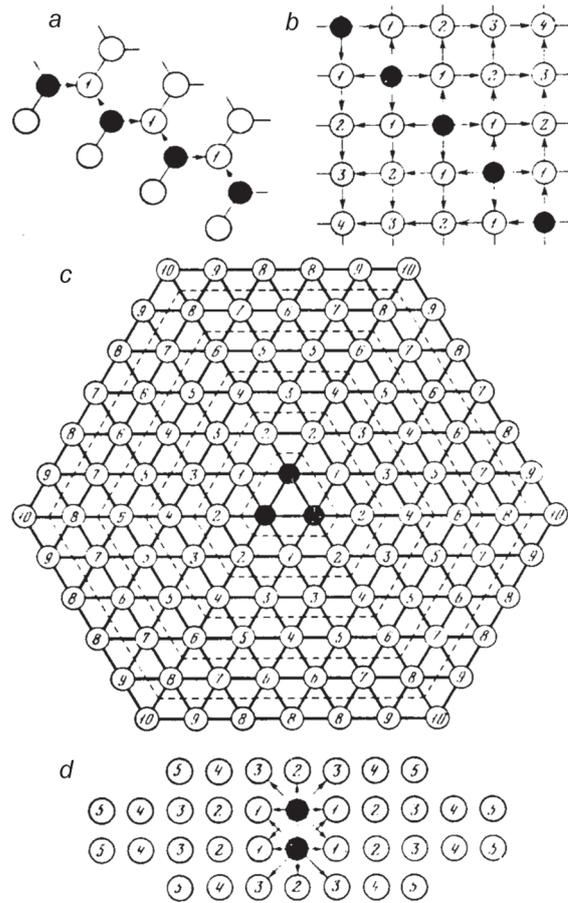


Рис. 7. Формы распространения возбуждения при пороге $\aleph = 2$: вырождение возбуждения в N_3^2 (a), N_4^2 (b); невырождающаяся волна в N_6^2 при $\theta = 2$ (c), в N_8^2 при $\theta = 1$ (d)

Fig. 7. Forms of propagation of excitation at the threshold $\aleph = 2$: excitation degeneracy in N_3^2 (a), N_4^2 (b); non-degenerate wave in N_6^2 at $\theta = 2$ (c), in N_8^2 at $\theta = 1$ (d)

для 3D-принтера, обеспечивающего прямое «выращивание» изделия сложной формы и структуры, так и для аддитивного синтеза его композиционного материала. При этом структурные элементы «мозаичного пространства» – клеточные машины, построенные на основе модели самовоспроизведения фон Неймана, могут применяться для описания процессов в конструкционных материалах и в функциональных биологических тканях.

Аддитивные процессы прямого «выращивания» изделий послойным синтезом в соответствии с особенностями конструирования формируемых слоев (по *BD*-технологиям) и оболочек (по *DD*-технологиям) раскрывают новые перспективы в ресурсном проектировании деталей машин. Использование самоорганизации поверхностных явлений позволяет формировать слои определенной регулируемой толщины по всей сложнопрофильной рабочей поверхности и управлять обеспечением свойств материала потоками энергии.

Рассмотрена континуальная модель точечной ткани «мозаичного пространства», в которой каждая точка не отличается по свойствам от клеток дискретной модели и находится в одном из трех состояний: покоя, возбуждения и рефрактивности. Показано, что распространение воздействий в технологической среде может описываться с применением классических волновых принципов для моделирования изменений и передачи состояний, структур и свойств материала.

Список использованных источников

1. Математика в современном мире / Р. Курант [и др.] ; предисл. В. А. Успенского. – М.: Мир, 1967. – 208 с.
2. Винер, Н. Кибернетика или управление и связь в живом и машине / Н. Винер. – М.: Совет. радио, 1958. – 296 с.
3. Кузин, Л. Н. Основы кибернетики : в 2 т. / Л. Н. Кузин. – М.: Энергия, 1979. – Т. 2: Основы кибернетических моделей. – 584 с.
4. Нейман фон, Дж. Теория самовоспроизводящих автоматов / Дж. фон Нейман. – М.: Мир, 1971. – 342 с.
5. Сигорский, В. П. Математический аппарат инженера / В. П. Сигорский. – Киев: Техника, 1977. – 768 с.
6. Перспективные технологии машиностроительного производства / О. П. Голубев [и др.] ; под общ. ред. Ж. А. Мрочека, М. Л. Хейфеца. – Новополоцк : Полоцк. гос. ун-т, 2007. – 204 с.
7. Мехатроника / Т. Исии [и др.] ; пер. с яп. С. А. Масленникова ; под. ред. В. В. Василькова. – М.: Мир, 1988. – 314 с.
8. Bradley, D. A. Mechatronics – Electronics in Products and Processes / D. A. Bradley. – London: Chapman & Hall, 1993. – 376 p.
9. Delchambre, A. Computer-aided Assembly Planning / A. Delchambre. – London: Chapman & Hall, 1992. – 276 p.
10. Сироткин, О. Технологический облик России на рубеже XXI века / О. Сироткин // Экономист. – 1998. – № 4. – С. 3–9.
11. Компьютеризированные интегрированные производства и CALS-технологии в машиностроении / Б. И. Черпаков [и др.] ; под ред. Б. И. Черпакова. – М.: ГУП ВИМИ, 1999. – 512 с.
12. CALS в авиастроении / А. Г. Братухин [и др.] ; под ред. А. Г. Братухина. – М.: Моск. авиац. ин-т, 2000. – 304 с.
13. Gibson, I. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. – N. Y.: Springer, 2015. – 498 p.
14. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении / М. А. Зленко, А. А. Попович, И. Н. Мутылина. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2013. – 222 с.
15. Additive Manufacturing – Statista Dussier. – N. Y.: Statista Inc., 2015. – 196 p.
16. Хроника индустриальных революций: от парового двигателя к цифровому производству. Кто будет жить на Интернет-глобусе через 100 лет / С. Рагимова [и др.] ; под ред. С. Рагимовой // Ростелеком Professional. – 2016. – № 3 (15). – С. 16–17, 24–29.
17. Хейфец, М. Л. Аддитивные синерготехнологии послойного синтеза изделий из композиционных материалов при воздействии потоками энергии / М. Л. Хейфец // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – № 4 (58). – С. 3–9.
18. Чижик, С. Синерготехнологии послойного синтеза изделий / С. Чижик, М. Хейфец // Наука и инновации. – 2016. – № 2 (156). – С. 13–16.
19. Витязь, П. А. Оперативное макетирование и производство изделий сложной формы из композиционных материалов / П. А. Витязь, А. Ф. Ильющенко, М. Л. Хейфец // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2011. – № 2. – С. 3–8.
20. Чижик, С. А. Перспективы развития технологических комплексов аддитивного синтеза композиционных материалов и формообразования изделий / С. А. Чижик, М. Л. Хейфец, С. А. Филатов // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – № 4 (29). – С. 68–74.
21. Хейфец, М. Л. Технологические методы повышающие производительность формообразования и качество поверхностных слоев деталей / М. Л. Хейфец // Технологическое управление качеством поверхности деталей : сб. науч. тр. – Киев: АТМ Украины, 1998. – С. 42–50.
22. Хейфец, М. Л. Модели и алгоритмы производства изделий без использования формообразующей оснастки / М. Л. Хейфец // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2001. – № 2. – С. 59–62.
23. Хейфец, М. Л. Формирование свойств материалов при послойном синтезе деталей / М. Л. Хейфец. – Новополоцк: Полоцк. гос. ун-т, 2001. – 156 с.

24. Интеллектуальное производство: состояние и перспективы развития / Л. М. Акулович [и др.] ; под общ. ред. М. Л. Хейфеца, Б. П. Чемисова. – Новополоцк: Полоцк. гос. ун-т, 2002. – 268 с.
25. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск: Беларус. навука, 2012. – 239 с.
26. Алферов, Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур / Ж. И. Алферов // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32, № 3.– С. 2–7.
27. Хейфец, М. Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М. Л. Хейфец.– М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.
28. Хейфец, М. Л. Анализ алгоритмов производства изделий по моделям самовоспроизведения фон Неймана / М. Л. Хейфец // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2001. – Т. 45, № 5. – С. 119–122.
29. Электрофизические методы получения покрытий из металлических порошков / Н. Н. Дорожкин [и др.]. – Рига: Зинатне, 1985. – 131 с.
30. Индукционная наплавка твердых сплавов / В. Н. Ткачев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1970. – 184 с.
31. Теория и практика газопламенного напыления / П. А. Витязь [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1993. – 296 с.
32. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / М. Л. Хейфец [и др.]. – Новополоцк: Полоцк. гос. ун-т, 2012. – 292 с.
33. Эйдельман, Е. Д. Возбуждение электрической неустойчивости нагреванием / Е. Д. Эйдельман // Успехи физ. наук. – 1995. – Т. 165, № 11. – С. 1279–1294.
34. Хейфец, М. Л. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей / М. Л. Хейфец, Л. М. Кожуро, Ж. А. Мрочек. – Гомель: Ин-т механики металлополимерн. систем им. В. А. Белого Нац. акад. наук Беларуси, 1999. – 276 с.
35. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова [и др.]. – М.: Наука, 1994. – 383 с.
36. Чижик, С. А. Технологические барьеры при высокоинтенсивных воздействиях в процессах послойного синтеза и обработки материалов / С. А. Чижик, М. Л. Хейфец, С. А. Филатов // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2015. – № 3. – С. 107–113.
37. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
38. Дружинин, В. В. Проблемы системологии / В. В. Дружинин, Д. С. Конторов. – М.: Совет. радио, 1976. – 296 с.
39. Цетлин, М. Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем / М. Л. Цетлин. – М.: Наука, 1969. – 368 с.
40. Смолянинов, В. В. Математические модели биологических тканей / В. В. Смолянинов. – М.: Наука, 1980. – 368 с.

References

1. Courant R. (et al.). *Mathematics in the Modern World*. Moscow, Mir Publ., 1967. 208 p. (in Russian).
2. Wiener N. *Cybernetics or control and communication in a living and a machine*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1958. 296 p. (in Russian).
3. Kuzin L. N. *Fundamentals of cybernetics. Volume 2. Fundamentals of cybernetic models*. Moscow, Energia Publ., 1979. 584 p. (in Russian).
4. von Neumann J. *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press, Urbana, 1966. 408 p.
5. Sigorskii V. P. *Mathematical apparatus of an engineer*. Kiev, Engineering Publ., 1977. 768 p. (in Russian).
6. Golubev O. P., Kuchta S. V., Mrochek Zh. A., Svirskii D. N., Soukhinenko B. N., Kheifetz M. L. *Advanced technologies of engineering production*. Novopolotsk, Polotsk State University, 2007. 204 p. (in Russian).
7. Isii T., Simoyama I., Inoue Kh. *Mechatronics*. Moscow, Mir Publ., 1988. 314 p. (in Russian).
8. Bradley D. A. *Mechatronics – Electronics in Products and Processes*. London, Chapman & Hall, 1993. 376 p.
9. Delchambre A. *Computer-aided Assembly Planning*. London, Chapman & Hall, 1992. 276 p. Doi: 10.1007/978-94-011-2322-8
10. Sirotkin O. Technological appearance of Russia at the turn of the XXI century. *Economist*, 1998, no. 4, pp. 3–9 (in Russian).
11. Al'perovich T. A., Barabanov V. V., Davydov A. N., Sergeev S. N., Sudov E. V., Cherpakov B. I. *Computerized integrated production and CALS-technologies in mechanical engineering*. Moscow, VIMI Publ., 1999. 512 p. (in Russian).
12. Bratukhin A. G. (ed.), Davydov Yu. V., Eliseev Yu. S. *CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support) in aircraft construction*. Moscow, Moscow Aviation Institute, 2000. 304 p. (in Russian).
13. Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. N. Y., Springer, 2015. 498 p.
14. Zlenko M. A., Popovich A. A., Mutylina I. N. *Additive technologies in mechanical engineering*. Sankt Petersburg, Publ. House of Polytechnic. University, 2013. 222 p. (in Russian).
15. *Additive Manufacturing – Statista Dussier*. N. Y., Statista Inc., 2015. 196 p.
16. Ragimova S. (ed.). Chronicle of industrial revolutions: From the steam engine to digital production. Who will live on the Internet globe in 100 years. *Rostelecom Professional*, 2016, no. 3 (15), pp. 16–17, 24–29 (in Russian).
17. Kheifetz M. L. Additive sinergotechnologies of layer-by-layer synthesis of articles made of composite materials when exposed to energy flows. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science intensive technologies in mechanical engineering], 2016, no. 4 (58), pp. 3–9 (in Russian).
18. Chizhik S. A., Kheifetz M. L. Sinergotechnologies of layer-by-layer synthesis of products. *Nauka i innovatsii* [Science and Innovations], 2016, no. 2 (156), pp. 13–16 (in Russian).

19. Vityaz P. A., Ilyushchenko A. F., Kheifetz M. L. Rapid prototyping and manufacture of articles with complex shapes made of composite materials. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science intensive technologies in mechanical engineering], 2011, no. 2, pp. 3–8 (in Russian).
20. Chizhik S. A., Kheifetz M. L., Filatov S. A. Prospects for development of technological systems for additive synthesis of composite materials and products shaping. *Mechanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials], 2014, no. 4 (29), pp. 68–74 (in Russian).
21. Kheifetz M. L. Technological methods of increasing the productivity and quality of formation of surface layers of articles. *Tekhnologicheskoe upravlenie kachestvom poverkhnosti detalei : sb. nauch. tr.* [Technological process of quality control of surfaces of parts: a collection of scientific works]. Kiev, ATM Ukraine, 1998, pp. 42–50 (in Russian).
22. Kheifetz M. L. Models and algorithms for production of articles without the use of form-building equipment. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2001, no. 2, pp. 59–62 (in Russian).
23. Kheifetz M. L. *Formation of materials properties at layer-by-layer synthesis of components*. Novopolotsk, Polotsk State University, 2001. 156 p. (in Russian).
24. Akulovich L. M., Anoshko A. P., Zeveleva E. Z., Kheifetz M. L. (ed.), Chemisov B. P. (ed.). *Intellectual production: state and prospects*. Novopolotsk, Polotsk State University, 2002. 268 p. (in Russian).
25. Rusetskii A. M. (ed.). *Theoretical bases of technological systems designing*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2012. 239 p. (in Russian).
26. Alferov Zh. I. The history and future of semiconductor heterostructures. *Semiconductors*, 1998, vol. 32, no. 1, pp. 1–14. Doi: 10.1134/1.1187350
27. Kheifetz M. L. *Design process of combined processing*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 272 p. (in Russian).
28. Kheifetz M. L. The analysis of algorithms of products manufacturing according to the models of von Neumann's self-reproduction. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Reports of the National Academy of Sciences of Belarus], 2001, vol. 45, no. 5, pp. 119–122 (in Russian).
29. Dorozhkin N. N., Mironov V. V., Vereshchagin V. A., Kot A. A. *Electrophysical methods for obtaining coatings from metal powders*. Riga, Zinatne Publ., 1985. 131 p. (in Russian).
30. Tkachev V. N., Fishteyn B. M., Kozintsev N. V. *Induction surfacing of hard alloys*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 184 p. (in Russian).
31. Vityaz P. A., Ivashko V. S., Manoilo E. D. *The theory and practice of flame spraying*. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1993. 296 p. (in Russian).
32. Kheifetz M. L., Akulovich L. M., Mrochek Zh. A., Zeveleva E. Z. *Electrophysical and electrochemical methods of materials processing*. Novopolotsk, Polotsk State University, 2012. 292 p. (in Russian).
33. Eidelman E. D. Excitation of electric instability by heating. *Physics-Uspekhi*, 1995, vol. 38, no. 11, pp. 1231–1246. Doi: 10.1070/pu1995v038n11abeh000118
34. Kheifetz M. L., Kozhuro L. M., Mrochek Zh. A. *Self-organization processes in the formation of surfaces*. Gomel, V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 1999. 276 p. (in Russian).
35. Ivanova V. S., Balankin A. C., Bunin I. Zh., Oksogoev A. A. *Synergetics and fractals in material science*. Moscow, Nauka Publ., 1994. 383 p. (in Russian).
36. Chizhik S. A., Kheifetz M. L., Filatov S. A. Technological barriers at high-exposure impacts related to the layering synthesis and processing of materials. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2015, no. 3, pp. 107–113 (in Russian).
37. Loitsianskii L. G. *Fluid mechanics*. Moscow, Nauka Publ., 1987. 840 p. (in Russian).
38. Druzhinin V. V., Cantorov D. S. *Problems of Systemology*. Moscow, Soviet Radio Publ., 1976. 296 p. (in Russian).
39. Tsetlin M. L. *Investigations on the theory of automata and modeling of biological systems*. Moscow, Nauka Publ., 1969. 368 p. (in Russian).
40. Smolyaninov V. V. *Mathematical models of biological tissues*. Moscow, Nauka Publ., 1980. 368 p. (in Russian).

Информация об авторах

Витязь Петр Александрович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, руководитель аппарата Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь), главный научный сотрудник, Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси. E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

Хейфец Михаил Львович – доктор технических наук, профессор, заместитель академика-секретаря Отделения физико-технических наук Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь), главный научный сотрудник, ГНПО «Центр» Национальной академии наук Беларуси. E-mail: mlk-z@mail

Information about the authors

Vitiaz Pyotr Aleksandrovich – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Head of Academy Staff of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus), Head Researcher, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

Kheifetz Mikhail Lvovich – D. Sc. (Engineering), Professor, Deputy Academician-Secretary of the Department of Physical-Engineering Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus), Head Researcher, State Scientific and Production Association “Center” of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: mlk-z@mail

Чижик Сергей Антонович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, первый заместитель Председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь), главный научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси. E-mail:chizhik@presidium.bas-net.by

Для цитирования

Витязь, П. А. «Индустрия 4.0»: от информационно-коммуникационных и аддитивных технологий к самовоспроизведению машин и организмов / П. А. Витязь, М. Л. Хейфец, С. А. Чижик // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 2. – С. 54–72.

Chizhik Sergei Antonovich – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Vice-Chairman of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus), Head Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail:chizhik@presidium.bas-net.by

For citation

Vitiaz P. A., Kheifetz M. L., Chizhik S. A. “Industry 4.0”: from information and communication and additive technologies to self-reproduction of machines and organisms. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no. 2, pp. 54–72 (in Russian).