

УДК 621:681.51

DOI:10.30987/2223-4608-2020-11-40-48

М.Л. Хейфец, д.т.н.

(Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь)

E-mail: mlk-z@mail.ru

Проектирование комплексов технологического оборудования для аддитивного и субтрактивного производства

Представлены методы и схемы послойного синтеза и формообразования деталей из композиционных материалов, построенные на использовании различных потоков энергии и компонентов материала при проектировании комплексов технологического оборудования для их использования в новом аддитивном и традиционном субтрактивном производстве. Приведены методы и схемы автоматизации и компьютерного управления процессами производства изделий.

Ключевые слова: технологическое оборудование; аддитивное производство; субтрактивное производство; послойный синтез; формообразование изделий.

M.L. Heifets, Dr.Sc.Tech.

(Institute of Applied Physics of NAS of Belarus, Minsk, Belarus)

Design of technological equipment complex for additive and subtractive production

Methods and schemes of layer-by-layer synthesis and composite parts shaping formed with the use of different energy flows and material components during designing technological equipment complexes for their use in new additive and common subtractive production are presented. There are shown methods and plans of automation and computer control of product manufacturing.

Keywords: technological equipment; additive production; subtractive production; layer-by-layer synthesis; product shaping.

Введение

При проектировании комплексов технологического оборудования, используемого в традиционном субтрактивном и в новом аддитивном производстве, применяются как широко известные, так и новые методы и схемы формообразования и послойного синтеза деталей, а также интенсивные процессы модифицирования свойств материалов концентрированными и распределенными потоками энергии [1 – 6].

Традиционно исходные данные для проектирования технологического оборудования содержат техническое задание конкретного заказчика, включающее следующее: 1) данные о материалах и готовых изделиях; 2) производительность оборудования; 3) характер и тип производства; 4) уровень автоматизации и

встраиваемость в современное высокотехнологичное производство [7, 8].

В этой связи, целью работы является развитие существующей методологии проектирования комплексов технологического оборудования при компьютерном управлении технологическими процессами, как для традиционных методов электро-физико-химического формообразования деталей, так и для новых методов послойного синтеза изделий из композиционных материалов в аддитивном производстве.

В этой связи, целью работы является развитие существующей методологии проектирования комплексов технологического оборудования при компьютерном управлении технологическими процессами, как для традиционных методов электро-физико-химического формообразования деталей, так и для новых методов послойного синтеза изделий из композицион-

ных материалов в аддитивном производстве.

Анализ стадий и этапов проектирования технологического оборудования для производства традиционного типа

Последовательность расчета технологического оборудования для производства традиционного типа включает укрупненные стадии, опирающиеся на расчетные схемы (рис. 1) [9, 10]:

1. Компоновка и выбор кинематической схемы (см. рис. 1, а).
2. Модульное построение по ограничительному набору агрегатов и узлов [11, 12].
3. Расчеты статических упругих перемещений, выбор схемы и прочностные расчеты (см. рис. 1, б).
4. Динамические расчеты устойчивости движений системы и статических отклонений

элементов, выбор схемы и динамические расчеты (см. рис. 1, в).

5. Тепловые расчеты, выбор термодинамической схемы и расчет температур (см. рис. 1, з).

6. Точностные расчеты, включающие определение точности геометрических и кинематических связей (см. рис. 1, а) с учетом деформаций: общей (см. рис. 1, б, в), термической (см. рис. 1, з) и в контакте (см. рис. 1, д).

7. Расчеты надежности и долговечности, включающие определение надежности агрегатов и узлов (см. рис. 1, а – в), с учетом тепловых и деформационных процессов (см. рис. 1, з, д) трения и изнашивания (см. рис. 1, е), и в завершение экономическое обоснование ресурса.

8. Анализ человеко-машинной системы, включающей также охрану труда и технику безопасности [7].

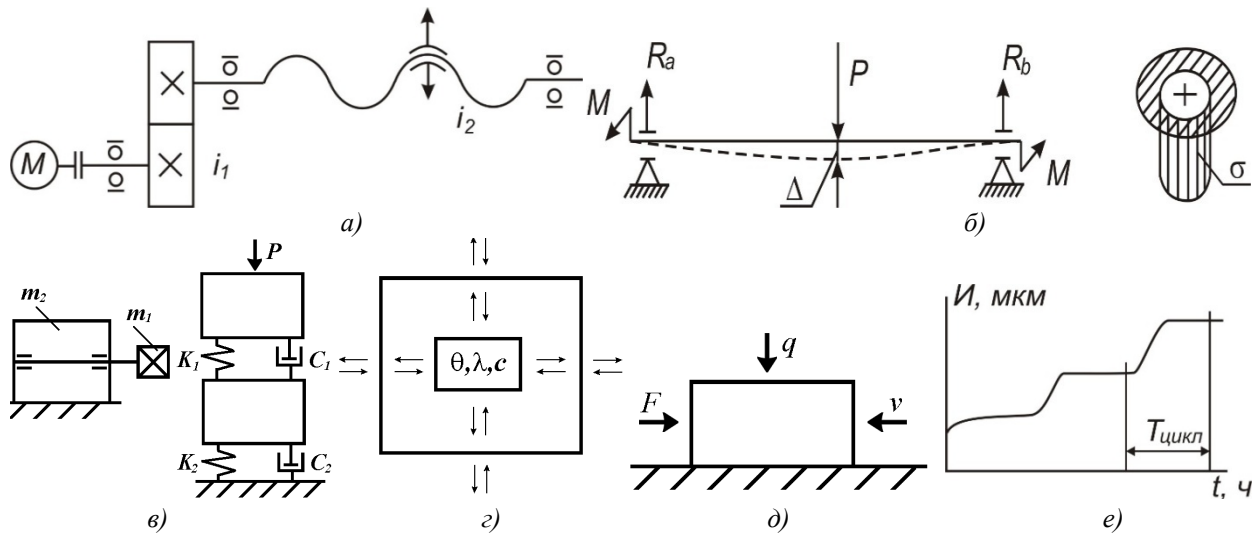


Рис. 1. Схемы основных систем технологического оборудования:

а – кинематическая; б – прочностная; в – динамическая; з – термодинамическая; д – контакта и трения; е – изнашивания и надежности

Далее по стадиям производится расчет основных систем технологического оборудования: несущих систем; направляющих движений; приводов движений и др.

Проектирование и расчет основных систем технологического оборудования производится по техническим требованиям к механическим агрегатам, технологической оснастке и средствам автоматизации; системам смазки, электрооборудованию и программируемым системам; системам диагностики, с учетом техники безопасности, эргономики и технологичности станка [1 – 4, 7, 8].

Для этого, в первую очередь, строятся схемы систем с учетом ограничительных наборов агрегатов и узлов: кинематическая (см. рис. 1, а); технологических модулей [11, 12]; прочностная (см. рис. 1, б); динамическая (см. рис. 1, в); термодинамическая (см. рис. 1, з); контакта и трения (см. рис. 1, д); изнашивания и надеж-

ности (см. рис. 1, е); человеко-машинная система в целом [7].

Затем после структурного синтеза проводится параметрическая оптимизация [13, 14], определяются основные параметры систем технологического оборудования.

Так, определение параметров кинематического модуля часто связано с оптимизацией его структуры, в частности, за счет рационального размещения в нем органов настройки [2]. Задача эта относится к структурно-параметрическому синтезу, в результате которого формируется рациональная структура объекта и находятся значения параметров его элементов, удовлетворяющие требованиям параметрического синтеза.

Рассмотрим путь решения этой задачи на примере дифференциального механического модуля с двумя ведущими звеньями 1 и 3, выходным звеном 2 и двумя органами настройки

i_x и i_y (рис. 2), который может использоваться для параллельного соединения двух кинематических групп [2].

Кинематические связи модуля $1 \rightarrow 4 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow 2$ и $3 \rightarrow 6 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow 2$ имеют общий участок 5-2 и присоединенные к нему че-

рез суммирующий механизм Σ автономные участки 1-4 и 3-6. Орган настройки i_x первой кинематической группы может быть расположен или в ее автономном участке 1-4 (см. рис. 2, а) или в общем участке (см. рис. 2, б).

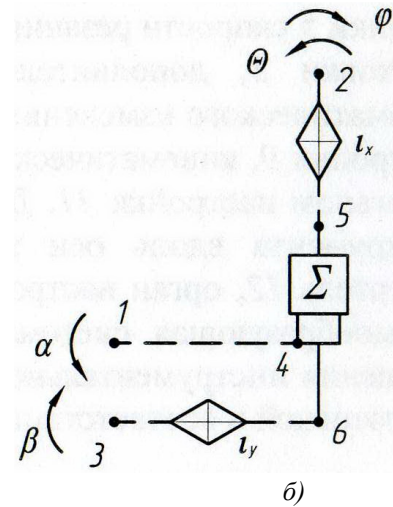
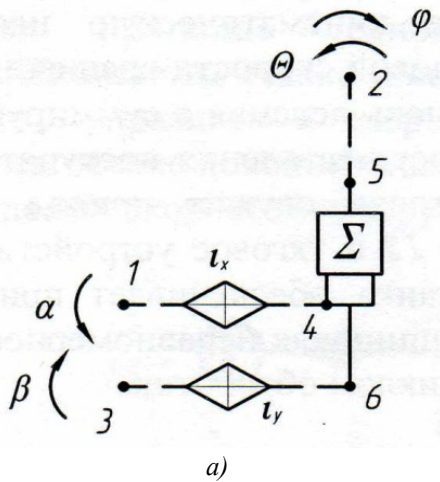


Рис. 2. Кинематические схемы соединения внутренних связей звеньев 1 – 6 кинематической цепи с расположением органов настройки i_x и i_y в автономных участках (а) и в общем участке (б)

Аналогично орган настройки i_y второй кинематической группы, также может быть расположен или в ее автономном участке 3-6 или в общем участке. Поэтому рассмотрим различные варианты размещения органов настройки i_x и i_y [2]. Пусть сначала они находятся в указанных автономных участках внутренних связей, тогда структуру этих связей можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} \alpha &\rightarrow 1 \rightarrow i_x \rightarrow 4 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow 2 \rightarrow \varphi + \theta \\ &\uparrow \\ \beta &\rightarrow 3 \rightarrow i_y \rightarrow 6. \end{aligned}$$

Когда один из органов настройки находится в общем участке 5-2, и если в нем расположить орган i_x , то получается следующая структура внутренних связей модуля:

$$\begin{aligned} \alpha &\rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow i_x \rightarrow 2 \rightarrow \varphi + \theta \\ &\uparrow \\ \beta &\rightarrow 3 \rightarrow i_y \rightarrow 6. \end{aligned}$$

При расположении органов настройки по первому варианту требуется перенастраивать оба органа настройки, что связано с увеличением трудоемкости, также зачастую невозможно обеспечить одинаковые значения передаточного отношения органа настройки и, следовательно, идентичность обработанных изделий по определенному параметру x . Поскольку во втором варианте значение i_y не зависит от параметра x , то при переходе к обработке изделия с иным значением этого параметра, требуется изменить передаточное отношение только органа i_x .

Каждый вариант структуры кинематического модуля характеризуется определенными значениями параметров органов настройки, по-разному влияющих на функциональные свойства проектируемого объекта, в данном случае формообразующей системы комплекса технологического оборудования [2]. Таким образом, параметрический синтез проектируемого объекта сводится к целенаправленному перебору возможных вариантов его структуры и определению на основе анализа варианта с рациональными значениями настраиваемых параметров.

Однако при формировании для автоматизированного субтрактивного и аддитивного производства, комплексов технологического оборудования, использующего концентрированные и распределенные потоки энергии (рис. 3) [1], этих 8-й стадий с определением параметров систем, выбором структур и соответствующих им схем, на каждой стадии первого традиционного этапа проектирования недостаточно [1 – 4].

Связано это с тем, что как для традиционных типов субтрактивного, так и новых типов аддитивного производства, заключающихся в послойном наращивании поверхности изделий, на следующем вновь вводимом этапе проектирования требуется дополнительно рассматривать схемы и определять параметры модулей технологического оборудования, описывающие подвод и распределение материала и энергии [5 – 8].

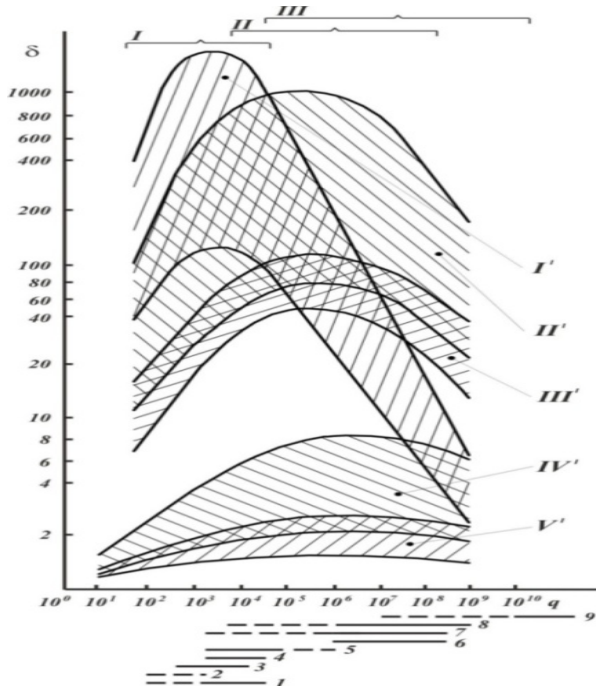


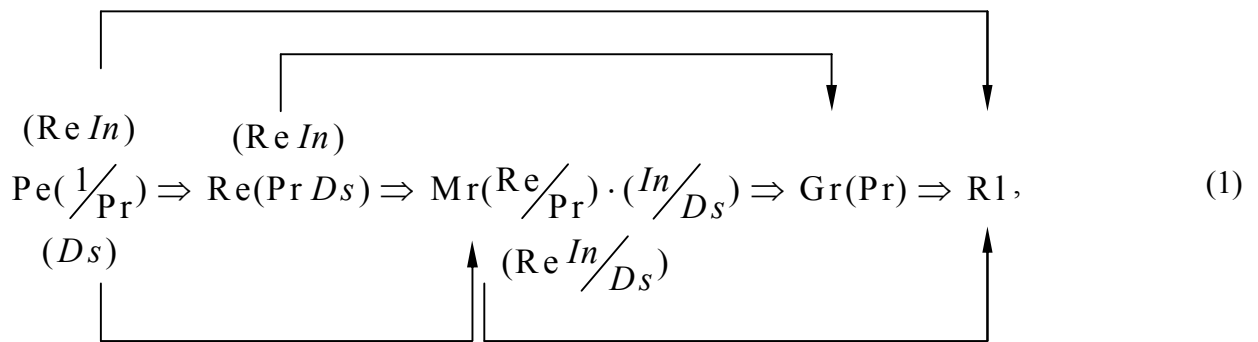
Рис. 3. Распределение методов обработки по точности формирования поверхностей:
 I – разделение материала; II – нанесение покрытий; III – термообработка; IV – резание инструментом; V – деформирование;
в зависимости от уровня концентрации в зонах выделения энергии:
 I – поверхностно-распределенных; II – множестве локализованных; III – сфокусированных;
 для источников: 1 – индукционный нагрев; 2 – газовое пламя; 3 – плазменная дуга; 4 – электроконтактный подогрев; 5 – сварочная дуга; 6 – искровой разряд; 7 – электронный, ионный луч; 8 – непрерывный лазер; 9 – импульсно-периодический лазер

Создание формы изделия в аддитивных технологиях происходит путем добавления материала, с использованием концентрированных источников энергии и распределенных полей, в отличие от традиционных технологий механической обработки, основанных на удалении «лишнего» материала [6, 15].

Широко применяемые в мировом производстве технологии позволяют заключить, что наиболее перспективно применение оборудования по наращиванию слоев и формообразованию поверхностей изделий, использующего различные сочетания материалов и источников энергии (см. рис. 3). 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 [5, 6, 9, 10, 16, 17].

Особенности проектирования комплексов технологического оборудования, использующего потоки энергии

Критерии тепломассопереноса устанавливают последовательность структурообразования в обрабатываемом материале и на формируемой поверхности при увеличении мощности воздействий [1, 5, 6, 10, 16]:



где $\text{Pe} = \frac{\nu t}{\omega}$ – критерий Пекле; $\text{Pr} = \frac{\nu}{\omega}$ – критерий Прандтля; $\text{Re} = \frac{\nu t}{\nu}$ – критерий Рейнольдса; $\text{In} = \frac{\beta g \nabla T t^2}{\nu^2}$ – отношение подъемной силы плавучести к инерционной силе; $Ds = \frac{\sigma_k \nabla T t}{(\nu \rho / \nu)}$ – отношение сил капиллярности и вязкости; $\text{Mr} = \frac{\sigma_k \nabla T t^2}{(\rho \omega \nu)}$ – кри-

терий Марангони; $\text{Gr} = \frac{\beta g \nabla T t^4}{\nu^2}$ – критерий Грасгофа; $\text{Rl} = \frac{\beta g \nabla T t^4}{(\omega \nu)}$ – критерий Рэлея; где t – характерный размер; ω – коэффициент температуропроводности; ν – скорость; ν – коэффициент кинематической вязкости; β – коэффициент объемного расширения; g – ускорение свободного падения; T – абсолютная температура; σ_k – коэффициент термокапиллярности; ρ – плотность технологической среды.

Критерии, характеризующие потоки энергии, при электрофизической обработке оказывают существенное влияние на последовательность поверхностных явлений и помогают управлять формированием свойств обрабатываемого материала [1, 5, 6, 16, 17]:

$$Sm(E_m/S_e) \Rightarrow Si \quad \text{и} \\ Mr(Ek) \Rightarrow E(Tk/Ek) \Rightarrow Rl, \quad (2)$$

где $Sm = IB / (v^2 \rho t)$ – критерий магнитного

воздействия; $Em = vE_1 / (H'B)$ – отношение

скорости потока к его теплосодержанию и напряженности электрического поля к его маг-

нитной индукции; $Se = E_1 t^2 / (IR)$ – критерий

напряженности электрического поля;

$Si = I^2 R / (v \rho H t^3)$ – энергетический крите-

рий; $Ek = \varepsilon \gamma^2 \nabla T / \sigma_k$ – отношение термо-

электрической и капиллярной сил;

$E = \varepsilon \gamma^2 \nabla T^2 t^2 / (\rho \omega v)$ – термо-электрический

критерий; $Tk = \rho \beta g t^2 / \sigma_k$ – отношение подь-

емной силы

плавучести к капиллярной силе; где I – сила тока; B – магнитная индукция; H' – энтальпия потока; R – электросопротивление; ε – диэлектрическая проницаемость; γ – коэффициент термоэлектродвижущей силы; E_1 – напряженность электрического поля.

Использование последовательностей критериев переноса (1) и (2) для анализа процессов образования структур и фаз материала многократно сокращает объем экспериментальных исследований технологии формирования поверхностного слоя при комбинированных методах термомеханической и электрофизической обработки [1, 10, 16].

При образовании неустойчивых структур поверхностных слоев целесообразно по критерию Рейнольдса, определять турбулентность течений и потоков обрабатываемого материала и описывать волнистость и шероховатость формирующегося рельефа поверхности R . Толщина формируемого слоя t , определяет увеличение или снижение его массы Q , а с

учетом сплошности или пористости слоя материала или покрытия изменяется их относительная твердость $H_\varepsilon = \Delta H / H$. Поэтому толщина слоя t пропорциональна выражению $Q / (1 - H_\varepsilon)$ [1, 16].

В результате при управлении потоками энергии целесообразно использовать соотношения, пропорциональные критериям переноса, для оптимизации геометрических характеристик рельефа поверхности:

$$R \sim \frac{v_S [Q / (1 - H_\varepsilon)]}{(B/I) \cdot (v/S)} = \frac{v_S S I Q}{v B (1 - H_\varepsilon)}, \quad (3)$$

и для оптимизации физико-механических параметров относительного упрочнения материала поверхностного слоя:

$$H_\varepsilon \sim 1 - \frac{v_S S I Q}{v B R}. \quad (4)$$

где v_S – суммарная скорость главного v и дополнительного S движений.

Соотношения (3) и (4) показывают положительную обратную связь рельефа R и отрицательную обратную связь упрочнения H_ε с производительностью обработки $v_S Q$, а также с регулируемыми кинематическими характеристиками оборудования (S/v) и мощности источника энергии (I/B) [1, 16].

Анализ соотношений (3) и (4) позволяет выделить основные принципы организации обратной связи в открытой технологической системе.

В случае, когда, в первую очередь, необходимо сформировать поверхность (3), а затем ее упрочнить (4), как, например, при деформировании и резании, в технологической системе при термомеханических воздействиях создается положительная обратная связь. Избыточные степени свободы инструмента и технологической среды, подавляя рассеяние потоков энергии и вещества в формоизменяемом припуске, создают упрочняющие структуры в поверхностном слое и повышают производительность обработки [1, 10, 16].

В том случае, когда сначала требуется упрочнить (4), а в завершение сформировать рельеф поверхности (3), как, например, при нанесении покрытий, в технологической системе при электрофизических воздействиях организуется отрицательная обратная связь. Дополнительные воздействия источниками энергии и веществами, формируя упрочняющие структуры в поверхностном слое, не допускают развития неустойчивости процесса при образовании рельефа поверхности и при его стабилизации не позволяют повысить производительность обработки [1, 10, 16].

Организация обратных связей в комплексе технологического оборудования через избыточные степени свободы инструментов, частиц наносимого материала и удаляемого слоя, а также посредством дополнительных воздействий потоками энергии, позволяет путем их самоорганизации управлять устойчивостью процессов формирования поверхностного слоя [10].

Поэтому, с учетом контуров прямых и обратных связей в технологической системе, требуется изучать схемы числового программного управления и рассматривать комплекс технологического оборудования как мехатронную систему [1, 3, 17].

Таким образом, если рассматривать комплекс технологического оборудования с позиций компьютеризации производственной деятельности, то такое оборудование, его узлы и детали следует проектировать как устройства компьютерной периферии, построенные по той же архитектуре, что и ЭВМ.

Проектирование комплексов технологического оборудования для аддитивного производства изделий

Для обозначения процессов аддитивного производства изделий в технологической системе чаще всего употребляют термины: прямое получение изделий сложной формы – «выращивание» (Solid Freeform Fabrication); послойное создание – «синтез» (Laminate Synthesis); быстрое макетирование – «прототипирование» (Rapid Prototyping); формирование трехмерных объектов – «печать» (3D Component Forming). Поэтому встает вопрос определения взаимосвязи процессов формообразования и разграничения используемых терминов [1, 5, 6, 15].

Для самовоспроизведения объектов, согласно модели фон Неймана [15], требуются машины: С – «копировщица плана построения»; О – «исполнительница плана построения»; S – «пусковое устройство» (включающее С и О в надлежащее время); V_{C+O+S} – «план построения автомата» (описывающий все элементы модели). В результате весь автомат выража-

ется символически $C+O+S+V_{C+O+S}$. После начального запуска S получает в свое распоряжение план построения автомата в целом V_{C+O+S} ; С копирует его, а О в свою очередь следует ему для построения С, О и S.

В результате можно представить [15, 16]:

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

Исследование процессов производства деталей без использования формообразующей оснастки [5, 15, 17], в зависимости от агрегатного состояния исходного материала, размерности потоков формообразующей среды и последовательности технологических операций, позволило представить совокупность методов «выращивания» деталей в виде структурной диаграммы связей (рис. 4).

Структурная диаграмма связей представляет собой направленный замкнутый граф и описывает автомат с конечным числом состояний [1, 5, 15, 16]. Вершины графа изображают процессы создания деталей без формообразующей оснастки 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 и порядка выполнения последующих процессов. Так, разные варианты технологических маршрутов имеют вид различных последовательностей при выборе в качестве начального процесса (см. рис. 4):

- прямого получения деталей сложной формы: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$; $4 \rightarrow 3$; $1 \rightarrow 5$; $4 \rightarrow 2' \rightarrow 5$; 6;
- послойного создания: $1' \rightarrow 4 \rightarrow 3$; $2 \rightarrow 3$; $1' \rightarrow 6$; $2 \rightarrow 4' \rightarrow 6$; 5;
- быстрого макетирования: $2' \rightarrow 1' \rightarrow 6$; $4' \rightarrow 6$; $2' \rightarrow 5$; $4' \rightarrow 1 \rightarrow 5$; 3.

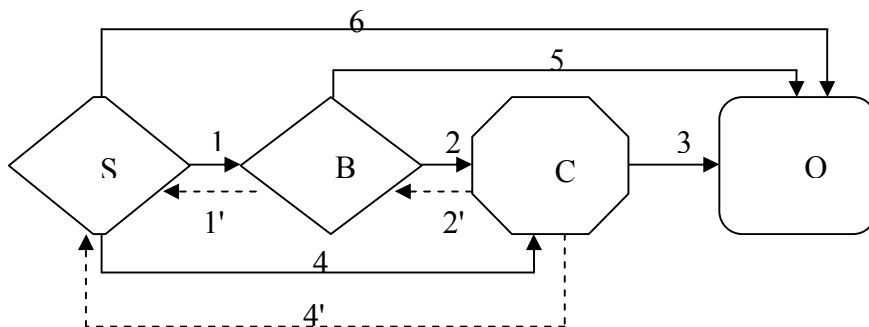


Рис. 4. Структурная диаграмма связей в способах изготовления деталей машин без формообразующей оснастки

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 традиционной неадаптивной технологической системы (деталью, инструментом, приспособлением, станком), приходим к выводу, что невозможно только при использовании формообразующей оснастки создать конечный автомат. Для изготовления детали должна существовать оснастка, а в свою очередь для ее создания должна быть также изготовлена оснастка и т.д.

Таким образом, предложенные согласно модели самовоспроизведения фон Неймана алгоритмы [1, 5, 15, 16] позволяют описывать способы изготовления деталей машин без формообразующей оснастки, а обратные им последовательности – неадаптивные способы, использующие оснастку, непредставимы в качестве конечного автомата.

Описание в соответствии с существующими терминами процессов изготовления деталей без формообразующей оснастки алгоритмами по предложенной структурной диаграмме связей предоставляет возможность анализировать существующие и разрабатывать новые методы прямого «выращивания» изделий [1, 5].

Проектирование комплексов мехатронного технологического оборудования в цифровизированном производстве

Мехатронные системы включают механическую, электромеханическую, электронную и управляющую (использующую компьютеры и микропроцессоры) части [1, 5, 6, 17]. В нее входят: датчики состояния как внешней среды, так и самой системы управления; источники энергии; исполнительные механизмы; усилители; вычислительные элементы (компьютеры и микропроцессоры). Мехатронная система представляет собой единый комплекс электромеханических и электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется непрерывный обмен энергией и информацией.

Функционально простую мехатронную систему технологического комплекса можно подразделить на следующие составные части: исполнительные устройства (объект управления и приводы), информационные устройства (датчики внутреннего состояния системы и датчики состояния внешней среды) и систему управления (компьютер и микропроцессоры) (рис. 5).

Взаимодействие между этими частями, реализующее прямые и обратные связи в системе, осуществляется через устройство со-

пряжения (интерфейс). Система управления включает аппаратные средства и программное обеспечение, которое управляет согласованной работой аппаратных средств и обеспечивает синхронизацию процессов сбора и обработки данных, поступающих от информационных устройств, с процессами, управляемыми исполнительными устройствами.

В результате мехатронный производственный модуль комбинированной обработки конструктивно подразделяется на электрическую и механическую составляющие, а также систему управления.

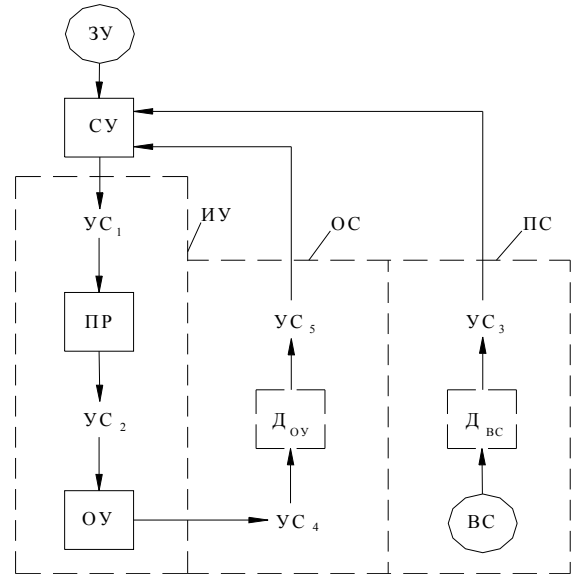


Рис. 5. Составные части мехатронной системы технологического комплекса:

ИУ – исполнительные устройства; ОС – обратная связь; ПС – прямая связь; ЗУ – задание на управление; СУ – система управления; УС – устройство сопряжения; ПР – приводы; ОУ – объект управления; Д_{оу} – датчики состояния объекта управления; Д_{вс} – датчики состояния внешней среды; ВС – внешняя среда

Обобщенная схема производственного модуля технологического комплекса (рис. 6) должна содержать все необходимые составляющие мехатронной системы: объекты управления; приводы; датчики; управляющие устройства, сопряженные между собой; систему программного обеспечения.

Гибкость функционирования мехатронной системы в цифровизированном производстве обеспечивается применением универсальных рабочих органов (инструментов и источников энергии), способных выполнять различные операции, или изменением модулей сменного инструмента, которые выбираются системой управления в соответствии с выполняемыми операциями, или управлением источниками энергии. В таких системах заранее определить

число и вид необходимых исполнительных устройств и датчиков невозможно.

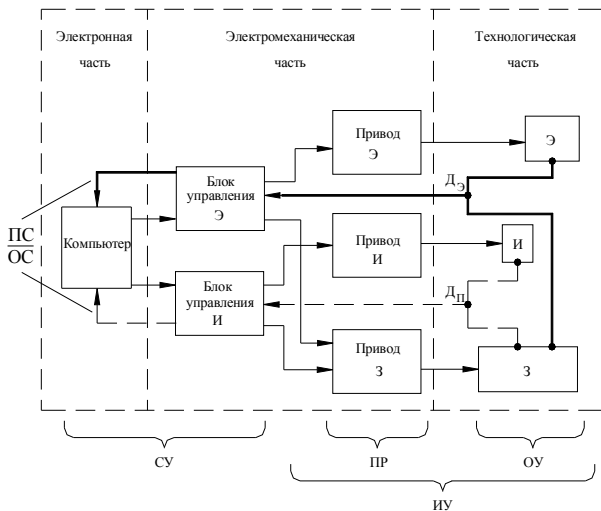


Рис. 6. Структурная схема мехатронной системы:
 З – заготовка; И – инструмент; Э – концентрированный источник энергии; Д_п – датчик перемещений;
 Д_э – датчик интенсивности потока энергии;
 СУ – система управления; ПР – приводы; ОУ – объект управления; ИУ – исполнительные устройства;
 ПС – прямая связь; ОС – обратная связь

Возникает необходимость решить две задачи: 1) обработать и систематизировать информацию, поступающую с датчиков; 2) обеспечить синхронизацию между этой информацией и движением исполнительных устройств. Это достигается программным обеспечением, управляющим работой соответствующих вычислительных средств.

Следовательно, важную роль в обеспечении многофункциональной работы мехатронной системы играют алгоритмические и программные средства. В результате структурная схема любого гибкого производственного модуля, использующего концентрированные источники энергии, должна иметь рассмотренные элементы, чтобы обеспечить модулю длительное время устойчивой работы в автономном режиме, используя минимальное количество управляющих воздействий.

Заключение

Анализ стадий и этапов проектирования технологического оборудования для производства традиционного типа и изучение особенностей формирования комплексов технологического оборудования, использующего потоки энергии и расходных материалов, исследование структурного синтеза мехатронных комплексов в цифровизированном производстве позволили дополнить новыми этапами процесс проектирования комплексов технологического оборудования как для традиционного автоматизированного субтрактивного,

так и нового аддитивного производства.

Дополнительные этапы проектирования включают:

- выбор источников энергии для интенсификации процессов и анализ реологии технологической среды, использующей потоки энергии;
- выделение прямых и обратных связей в технологической системе при электрофизических и термомеханических воздействиях;
- структурный анализ открытой производственной системы и синтез технологических комплексов, использующих источники энергии;
- параметрическую оптимизацию модулей и установок, инструментов и средств оснащения технологического комплекса;
- компоновку производственных модулей и синтез адаптивной мехатронной системы высокоэффективной обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Теоретические** основы проектирования технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларуская навука, 2012. – 239 с.
2. **Конструирование** и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларуская навука, 2014. – 316 с.
3. **Автоматизация** и управление в технологических комплексах / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларуская навука, 2014. – 375 с.
4. **Обеспечение** качества изделий в технологических комплексах / С.А. Чижик [и др.]; под общ. ред. М.Л. Хейфеца. – Минск: Беларуская навука, 2019. – 248 с.
5. **Витязь, П.А., Хейфец, С.А. Чижик, М.Л.** «Индустрия 4.0»: от информационно-коммуникационных и аддитивных технологий к самовоспроизведению машин и организмов // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2017. – № 2. – С. 54-72.
6. **Витязь, П.А., Хейфец, С.А. Чижик, М.Л.** Состояние и перспективы развития технологических комплексов аддитивного производства изделий из композиционных материалов // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2017. – № 7(73). – С. 42-48.
7. **Машиностроение: Энциклопедия** / ред. совет: К.В. Фролов (пред.). Т. IV-7. Металлорежущие станки и деревообрабатывающее оборудование / Б.И. Черпаков [и др.]; под ред. Б.И. Черпакова. – М.: Машиностроение, 2002. – 864 с.
8. **Проектирование** металлорежущих станков и станочных систем: справочник-учебник. Т.1. Проектирование станков / А.С. Проников [и др.]; под ред. А.С. Проникова. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана. – Машиностроение, 1994. – 444 с.
9. **Васильев, А.С.** Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев, А.М. Дальский, С.А. Клименко, Л.Г. Полонский, М.Л. Хейфец, П.И. Ящерицын. – М.: Машиностроение, 2003. – 256 с.
10. **Хейфец, М.Л.** Проектирование процессов комбинированной обработки. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.
11. **Базров, Б.М.** Модульная технология в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.

12. **Базров, Б.М., Хейфец, М.Л.** Метод представления изделия как объекта цифровизации производства структурированным множеством модулей // Доклады НАН Беларуси. – 2019. – Т. 63. – № 3. – С. 377-384.

13. **Артоболевский, И.И.** Основы синтеза систем машин автоматического действия / И.И. Артоболевский, Д.Я. Ильинский. – М.: Наука, 1983. – 280 с.

14. **Врагов, Ю.Д.** Анализ компоновок металлорежущих станков: Основы компонетики. – М.: Машиностроение, 1978. – 208с.

15. **Хейфец, М.Л.** От аддитивного производства к самовоспроизведению машин, их узлов и деталей // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – № 4(70). – С. 37-48.

16. **Vitiaz, P.A.** Laser-Plasma Techniques in Computer-Controlled Manufacturing / P.A. Vitiaz, M.L. Kheifetz, S.V. Koukhta. – Minsk: Belorusskaya nauka, 2011. – 164 p.

17. **Чижик, С.А., Хейфец, М.Л., Филатов, С.А.** Перспективы развития технологических комплексов аддитивного синтеза композиционных материалов и формообразования изделий // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – №4(29). – С. 68-74.

REFERENCES

1. *Theoretical Fundamentals of Technological Complex Designing* / A.M. Rusetsky [et al.]; under the general editorship of A.M. Rusetsky. – Minsk: Belorussian Science, 2012. – pp. 239.

2. *Design and Equipment of Technological Complexes* / A.M. Rusetsky [et al.]; under the general editorship of A.M. Rusetsky. – Minsk: Belorussian Science, 2014. – pp. 316.

3. *Automation and Control in Technological Complexes* / A.M. Rusetsky [et al.]; under the general editorship of A.M. Rusetsky. – Minsk: Belorussian Science, 2014. – pp. 375.

4. *Product Quality Support in Technological Complexes* / S.A. Chizhik [et al.]; under the general editorship of M.L. Heifets. – Minsk: Belorussian Science, 2019. – pp. 248.

5. Vityaz, P.A., Heifets, S.A. Chizhik M.L. "Industry 4.0" From information-communication and additive technologies to machine and organism self-production // *Proceedings of NAS of Belarus. Physical and Engineering Sciences Series*. – 2017. – No.2. – pp. 54-72.

6. Vityaz, P.A., Heifets, S.A. Chizhik, M.L. State and out

looks in development of technological complexes of composite product additive production // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – No.7(73). – pp. 42-48.

7. *Mechanical Engineering: Encyclopedia* / Editorial board: K.V. Frolov (Chairman). Vol.IV-7. Machine-tools and Wood Processing Equipment / B.I. Cherpakov [et al.]; under the editorship of B.I. Cherpakov. – M.: Mechanical Engineering, 2002. – pp. 864.

8. *Design of Machine-tools and Machine Systems: reference book-textbook*. Vol.1. Machine Design / A.S. Pronikov [et al.]; under the editorship of A.S. Pronikov. – M.: Bauman STU of Moscow. – Mechanical Engineering, 1994 – pp. 444.

9. Vasiliev, A.S. *Technological Fundamentals of Machine Quality Control* / A.S. Vasiliev, A.M. Dalsky, S.A. Klimentko, L.G. Polonsky, M.L. Heifets, P.I. Yashcheritsyn. – M.: Mechanical Engineering, 2003. – pp. 256.

10. Heifets, M.L. *Combined Processing Design*. – M.: Mechanical Engineering, 2005. – pp. 272.

11. Bazrov, B.M. *Module Technology in Mechanical Engineering*. – M.: Mechanical Engineering, 2001. – pp. 368.

12. Bazrov, B.M., Heifets, M.L. Method of product presentation as object of production digitalization with structured multitude of modules // *Proceedings of the NAS of Belarus*. – 2019. – Vol. 63. – No.3. – pp. 377-384.

13. Artobolevsky, I.I. *Fundamentals of Synthesis of Automatic Machines* / I.I. Artobolevsky, D.Ya. Iliynsky. – M.: Science, 1983. – pp. 280.

14. Vragov, Yu.D. *Analysis of Machine-tool Arrangement: Assembling Fundamentals*. M.: Mechanical Engineering, 1978. – pp. 208.

15. Heifets, M.L. From additive production to self-production of machines, their units and parts // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – No.4(70). – pp. 37-48.

16. Vitiaz, P.A. Laser-Plasma Techniques in Computer-Controlled Manufacturing / P.A. Vitiaz, M.L. Kheifetz, S.V. Koukhta. – Minsk: Belorusskaya nauka, 2011. – 164 p.

17. Chizhik, S.A., Heifets, M.L., Filatov, S.A. Outlooks in development of technological complexes of composite additive synthesis of product shaping // *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. – 2014. – No.4(29). – pp. 68-74.

Рецензент акад. НАН Беларуси
А.П. Ласковнев

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала (4832) 51-51-38, 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Верстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов.

Сдано в набор 16.11.2020. Выход в свет 30.11.2020.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
"Брянский государственный технический университет"
241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+