



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621:681.51

С.А. ЧИЖИК, акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.
заведующий лабораторией нанопроцессов и технологий¹
E-mail: chizhik@presidium.bas-net.by

М.Л. ХЕЙФЕЦ, д-р техн. наук, проф.
директор²
E-mail: kheifetz@iaph.bas-net.by

Н.Л. ГРЕЦКИЙ
заведующий отделом³
E-mail: nikolay-gnl@mail.ru

¹Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

²Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

³ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 23.10.2020.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АДДИТИВНОГО И СУБТРАКТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Проведен анализ стадий и этапов проектирования технологического оборудования для традиционного производства, изучены особенности формирования технологического оборудования, использующего потоки энергии и расходных материалов. Структурный синтез мехатронных комплексов в цифровизированном производстве позволил дополнить новыми этапами процесс создания технологического оборудования как для традиционного автоматизированного субтрактивного, так и нового аддитивного производства. Описанные алгоритмами по предложенной структурной диаграмме связи процессы изготовления деталей без формообразующей оснастки, предоставляют возможность анализировать существующие и разрабатывать новые методы послойного синтеза изделий. Показано, как при проектировании технологического оборудования для его использования в новом аддитивном и традиционном субтрактивном производстве применяются методы и схемы послойного синтеза и формообразования деталей из композиционных материалов, построенные на использовании различных потоков энергии и компонентов материала, а также методы и схемы автоматизации и компьютерного управления процессами производства изделий.

Ключевые слова: технологическое оборудование, аддитивное и субтрактивное производство, послойный синтез, формообразование изделий

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-1-54-54-61>

Введение. При проектировании 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 содержит техническое задание конкретного заказчика, включающее только [7, 8]:

- данные о материалах и готовых изделиях;

- производительность оборудования;
- характер и тип производства;
- уровень автоматизации и встраиваемость в современное высокотехнологичное производство.

В этой связи, целью работы являлось дополнение существующей методологии проектирования технологического оборудования как для традиционного автоматизированного субтрактивного, так и нового аддитивного производства, применяющего методы и схемы послойного синтеза и формообразования деталей из композиционных материалов, построенного на использовании различных потоков энергии и внесении совокупности компонентов материала, а также на компьютерном управлении технологическими процессами.

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 (рисунок 1) [9, 10]:

1. Компоновка и выбор кинематической схемы (см. рисунок 1 *a*).

2. Модульное построение по ограничительному набору агрегатов и узлов [11, 12].

3. Расчеты статических упругих перемещений, выбор схемы и прочностные расчеты (см. рисунок 1 *b*).

4. Динамические расчеты устойчивости движений системы и статических отклонений элементов, выбор схемы и динамические расчеты (см. рисунок 1 *c*).

5. Тепловые расчеты, выбор термодинамической схемы и расчет температур (см. рисунок 1 *d*).

6. Точностные расчеты, включающие определение точности геометрических и кинематических связей (см. рисунок 1 *a*) с учетом деформаций: общей (см. рисунок 1 *b, c*), термической (см. рисунок 1 *d*) и в контакте (см. рисунок 1 *e*).

7. Расчеты надежности и долговечности, включающие определение надежности агрегатов и узлов (см. рисунок 1 *a-c*), с учетом тепловых и деформационных процессов (см. рисунок 1 *d, e*) трения и изнашивания (см. рисунок 1 *f*), и в завершение экономическое обоснование ресурса.

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

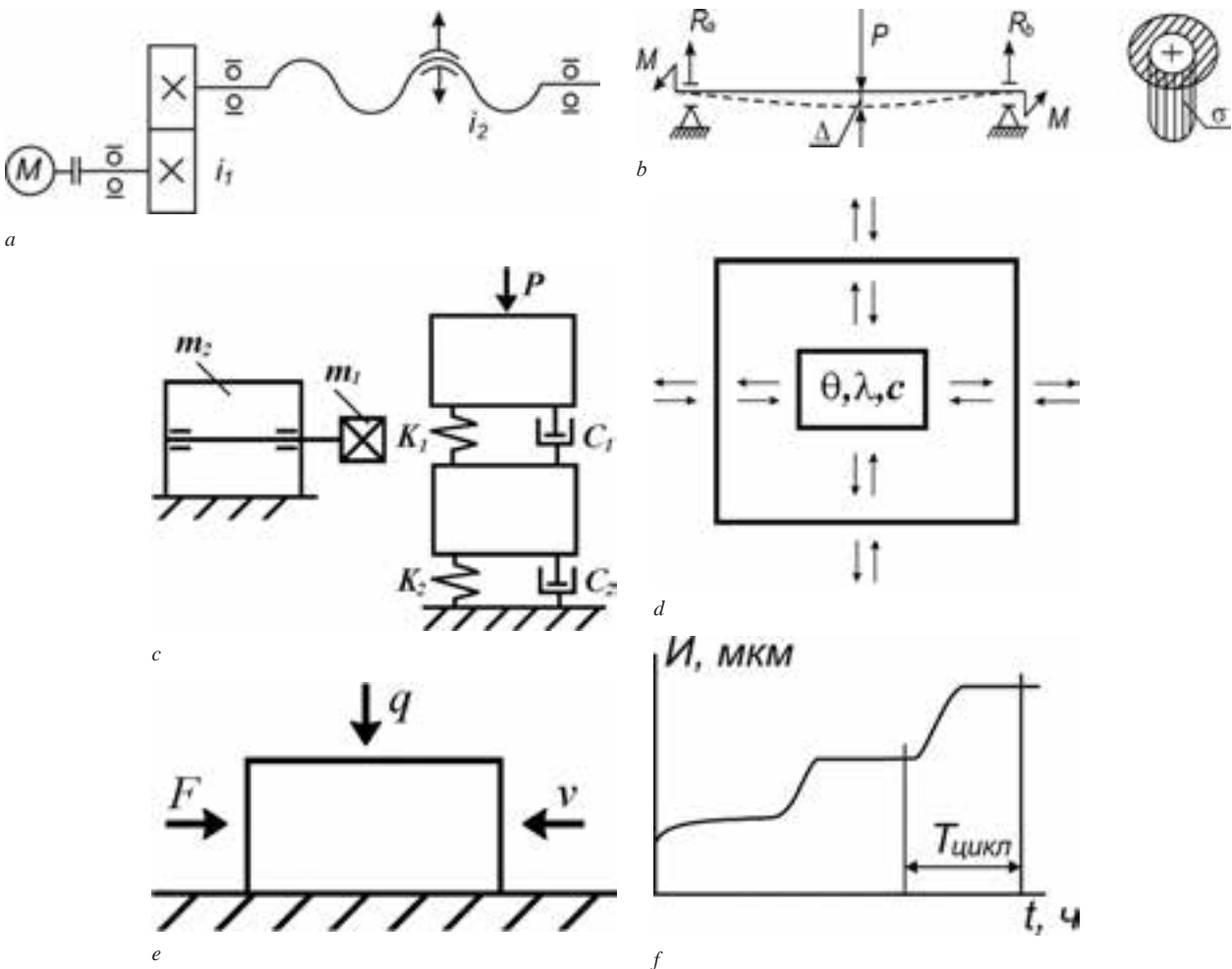


Рисунок 1 — Схемы основных систем технологического оборудования: *a* — кинематическая; *b* — прочностная; *c* — динамическая; *d* — термодинамическая; *e* — контакта и трения; *f* — изнашивания и надежности

Figure 1 — Diagrams of the main systems of technological equipment: *a* — kinematic system; *b* — strength system; *c* — dynamic system; *d* — thermodynamic system; *e* — contact and friction system; *f* — wear and reliability system

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

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. рисунок 1 а);
- технологических модулей [11, 12];
- прочностная (см. рисунок 1 б);
- динамическая (см. рисунок 1 с);
- термодинамическая (см. рисунок 1 д);
- контакта и трения (см. рисунок 1 е);
- изнашивания и надежности (см. рисунок 1 ф);
- человеко-машинная система в целом [7].

Однако при формировании для автоматизированного субтрактивного и аддитивного производства комплексов технологического оборудования, использующего концентрированные и распределенные потоки энергии (рисунок 2) [1], этих 8 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].

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, 13].

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. рисунок 2). 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, 14, 15].

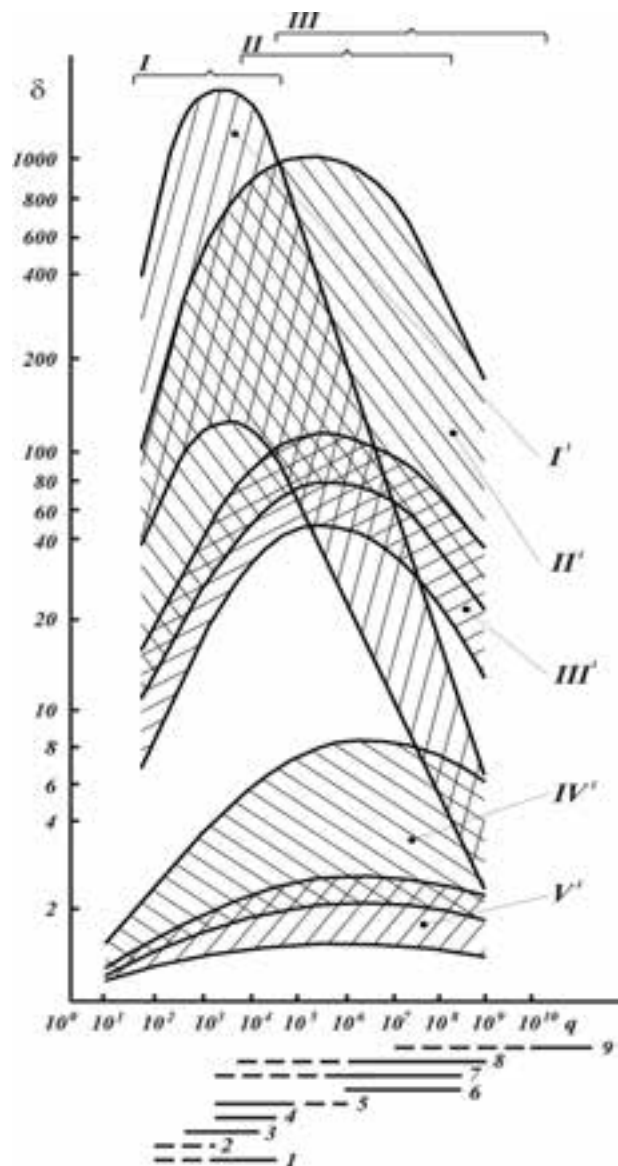


Рисунок 2 — Распределение методов обработки по точности формирования поверхностей (I' — разделение материала; II' — нанесение покрытий; III' — термообработка; IV' — резание инструментом; V' — деформирование); в зависимости от уровня концентрации в зонах выделения энергии (I — поверхностно-распределенных; II — множество 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)

Figure 2 — Distribution of processing methods according to the accuracy of surface formation (I' — separation of the material; II' — applying coating; III' — heat treatment; IV' — cutting with a tool; V' — deformation); depending on the level of concentration in the energy release zones (I — surface-distributed; II — a set of localized; III — focused); for sources (1 — induction heating; 2 — gas flame; 3 — plasma arc; 4 — electric contact heating; 5 — welding arc; 6 — spark discharge; 7 — electron, ion beam; 8 — continuous laser; 9 — pulse-periodic laser)

Особенности проектирования технологического оборудования, использующего потоки энергии. Использование последовательностей критериев тепло- и массопереноса, электро- и физико-химических критериев для анализа процессов образования структур и фаз материала многократно

сокращает объем экспериментальных исследований технологии формирования поверхностного слоя при комбинированных методах термомеханической и электрофизико-химической обработки [1, 10, 14].

Так, при образовании неустойчивых структур поверхностных слоев целесообразно по критерию

Рейнольдса $Re = \frac{vt}{\nu}$, определять турбулентность

течений и потоков, движущихся со скоростью v , обрабатываемого материала с кинематической вязкостью ν , 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 $H_e = \Delta H / H$. Поэтому толщина слоя t пропорциональна выражению $Q / (1 - H_e)$ [1, 14].

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

$$R \sim \frac{v_s [Q / (1 - H_e)]}{(B/I) \cdot (v/S)} = \frac{v_s SIQ}{\nu B(1 - H_e)} \quad (1)$$

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

$$H_e \sim 1 - \frac{v_s SIQ}{\nu BR}, \quad (2)$$

где v_s — суммарная скорость главного v и дополнительного S движений; B — магнитная индукция; I — сила тока источника энергии.

Соотношения (1) и (2) показывают положительную обратную связь рельефа R и отрицательную обратную связь упрочнения H_e с производительностью обработки $v_s Q$, а также с регулируемыми кинематическими характеристиками оборудования (S/v) и мощности источника энергии (I/B) [1, 14].

Анализ соотношений (1) и (2) позволяет выделить основные принципы организации обратной связи в открытой технологической системе.

В случае, когда в первую очередь необходимо сформировать поверхность (1), а затем ее упрочнить (2), 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, 14].

В том случае, когда сначала требуется упрочнить (2), а в завершение сформировать рельеф поверхности (1), 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 поднять производительность обработки [1, 10, 14].

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 также изучать схемы числового программного управления и рассматривать комплекс технологического оборудования как мехатронную систему [1, 3, 15].

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 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, 13].

Для самовоспроизведения объектов, согласно модели фон Неймана [13], 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 выражается 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 [13, 14]:

- 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, 13, 15] 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 (рисунок 3).

Структурная диаграмма связей представляет собой направленный замкнутый граф и описывает автомат с конечным числом состояний [1, 5, 13, 14]. 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. рисунок 3):

- 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: $2' \rightarrow 1' \rightarrow 6; 4' \rightarrow 6; 2' \rightarrow 5; 4' \rightarrow 1 \rightarrow 5; 3.$

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 цифровизованном производстве.

Мехатронные системы включают механическую, электромеханическую, электронную и управляющую (использующую компьютеры и микропроцессоры) части [1, 5, 6, 15]. 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) (рисунок 4).

Взаимодействие между этими частями, реализующее прямые и обратные связи в системе, осуществляется через устройство сопряжения (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.

Обобщенная схема производственного модуля технологического комплекса (рисунок 5) должна содержать все необходимые составляющие мехатронной системы: объекты управления; приводы; датчики; управляющие устройства,

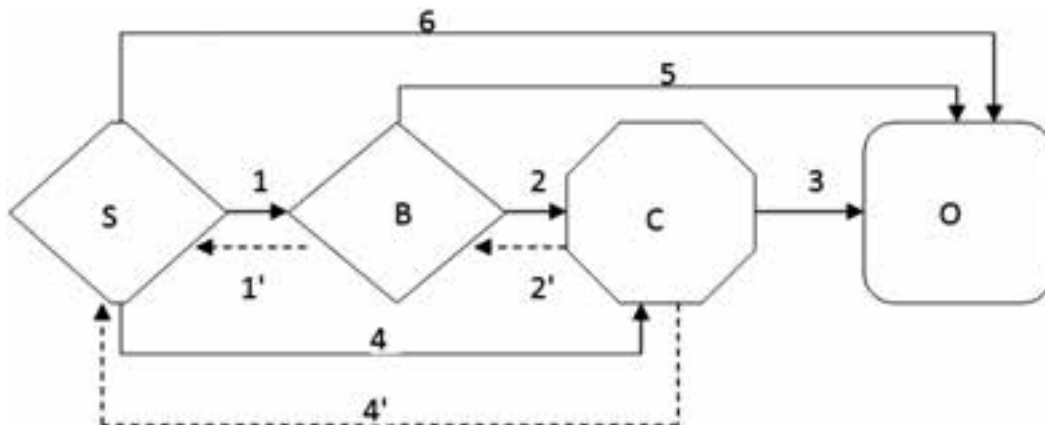


Рисунок 3 — Структурная диаграмма связей в способах изготовления деталей машин без формообразующей оснастки
Figure 3 — Structural diagram of relations in the methods of manufacturing machine parts without forming equipment

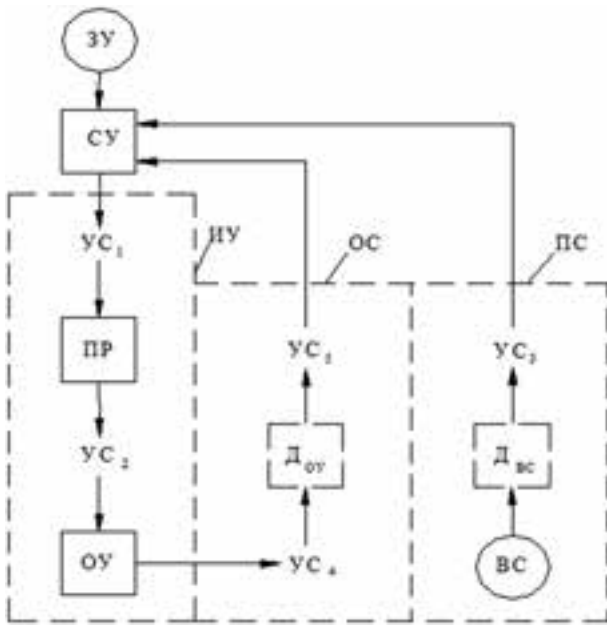


Рисунок 4 — Составные части мехатронной системы технологического комплекса: ИУ — исполнительные устройства; ОС — обратная связь; ПС — прямая связь; ЗУ — задание на управление; СУ — система управления; УС — устройство сопряжения; ПР — приводы; ОУ — объект управления; Д_{оу} — датчики состояния объекта управления; Д_{вс} — датчики состояния внешней среды; ВС — внешняя среда
Figure 4 — Components of the mechatronic system of the technological complex: ИУ — actuators; ОС — feedback; ПС — feedforward; ЗУ — control task; СУ — control system; УС — interface device; ПР — drives; ОУ — control object; Д_{оу} — sensors of the control object; Д_{вс} — sensors of the external environment; ВС — external environment

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.

Возникает необходимость решить две задачи: обработать и систематизировать информацию, поступающую с датчиков; 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.

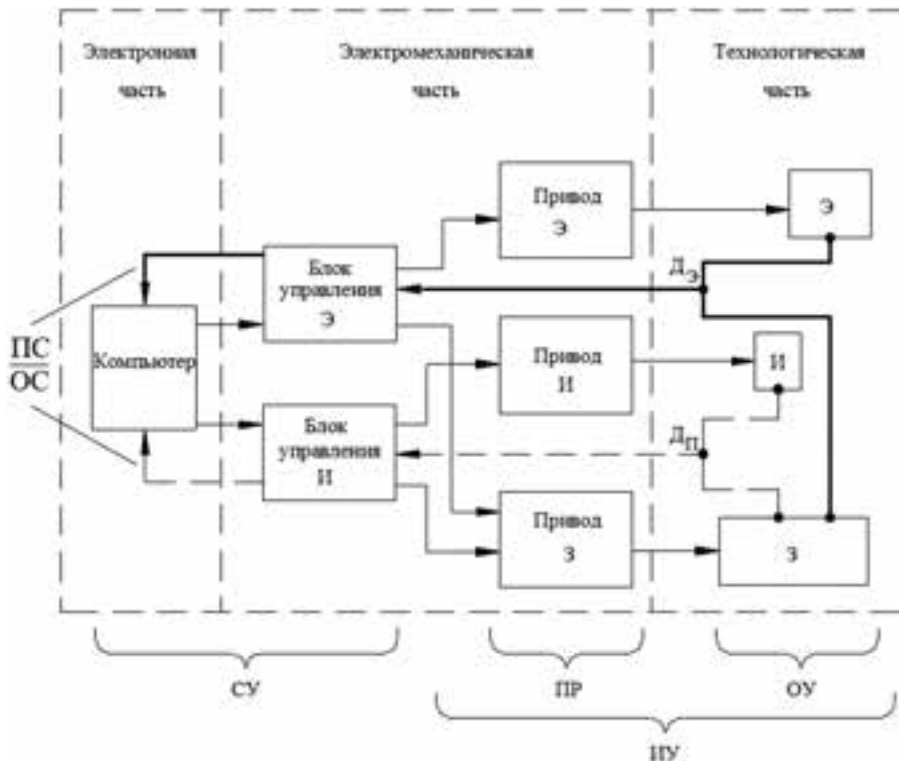


Рисунок 5 — Структурная схема мехатронной системы: З — заготовка; И — инструмент; Э — концентрированный источник энергии; Д_и — датчик перемещений; Д_з — датчик интенсивности потока энергии; СУ — система управления; ПР — приводы; ОУ — объект управления; ИУ — исполнительные устройства; ПС — прямая связь; ОС — обратная связь

Figure 5 — Block diagram of a mechatronic system: З — blank; И — tool; Э — concentrated energy source; Д_и — displacement sensor; Д_з — energy flow intensity sensor; СУ — control system; ПР — drives; ОУ — control object; ИУ — actuators; ПС — feedforward; ОС — feedback

Заключение. Таким образом, анализ стадий и этапов проектирования технологического оборудования для традиционного производства, изучение особенностей формирования технологического оборудования, использующего потоки энергии и расходных материалов, а также структурный синтез мехатронных комплексов в цифровизированном производстве позволили дополнить новыми этапами процесс создания технологического оборудования как для традиционного автоматизированного субтрактивного, так и нового аддитивного производства.

Список литературы

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. «Индустрия 4.0»: от информационно-коммуникационных и аддитивных технологий к самовоспроизведению машин и организмов / П.А. Витязь, М.Л. Хейфец, С.А. Чижик // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. — 2017. — № 2. — С. 54–72.
6. Витязь, П.А. Состояние и перспективы развития технологических комплексов аддитивного производства изделий из композиционных материалов / П.А. Витязь, М.Л. Хейфец, С.А. Чижик // Научно-технические технологии в машиностроении. — 2017. — № 7(73). — С. 42–48.
7. Машиностроение: энциклопедия / ред. совет: К.В. Фролов (пред.); Б.И. Черпаков [и др.]; под ред. Б.И. Черпакова. — М.: Машиностроение, 2002. — Т. IV-7. Металлорежущие станки и деревообрабатывающее оборудование. — 864 с.
8. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: справочник-учебник / А.С. Проников [и др.]; под ред. А.С. Проникова. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1994. — Т. 1. Проектирование станков. — 444 с.
9. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев [и др.]. — М.: Машиностроение, 2003. — 256 с.
10. Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М.Л. Хейфец. — М.: Машиностроение, 2005. — 272 с.
11. Базров, Б.М. Модульная технология в машиностроении / Б.М. Базров. — М.: Машиностроение, 2001. — 368 с.
12. Базров, Б.М. Метод представления изделия как объекта цифровизации производства структурированным множеством модулей / Б.М. Базров, М.Л. Хейфец // Доклады НАН Беларуси. — 2019. — Т. 63, № 3. — С. 377–384.
13. Хейфец, М.Л. От аддитивного производства к самовоспроизведению машин, их узлов и деталей / М.Л. Хейфец // Научно-технические технологии в машиностроении. — 2017. — № 4(70). — С. 37–48.
14. Vitiyaz, P.A. Laser-Plasma Techniques in Computer-Controlled Manufacturing / P.A. Vitiyaz, M.L. Kheifetz, S.V. Koukhita. — Minsk: Belorusskaya nauka, 2011. — 164 p.
15. 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.

CHIZHIK Sergei A., Academician of the NAS of Belarus, D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Laboratory of Nanoprocesses and Technologies¹

E-mail: chizhik@presidium.bas-net.by

KHEIFETZ Mikhail L., D. Sc. in Eng., Prof.

Director²

E-mail: kheifetz@iaph.bas-net.by

GRETSKIY Nikolay L.

Head of the Department³

E-mail: nikolay-gnl@mail.ru

¹A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

³Open Joint Stock Company “NPO Center” of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 23 October 2020.

DESIGN OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR ADDITIVE AND SUBTRACTIVE MANUFACTURING

The analysis of design stages of technological equipment for traditional production is carried out, the features of the formation of technological equipment are studied using flows of energy and consumables. Structural synthesis of mechatronic complexes in digitalized production made it possible to add new stages to the process of creating technological equipment for both traditional automated subtractive manufacturing and new additive manufacturing. The processes of manufacturing parts without shape-generating molding tools, described by the algorithms according to the proposed structural diagram of connections, provide an opportunity to analyze existing and develop new methods of laminate synthesis of products. It is shown, how in the design of technological equipment for their use in new additive and traditional subtractive

manufacturing, methods and schemes of laminate synthesis and shaping of parts from composite materials are used, based on the application of various energy flows and material components, as well as methods and schemes of automation and computer product manufacturing process management.

Keywords: technological equipment, additive and subtractive manufacturing, laminate synthesis, product shaping

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-1-54-54-61>

References

- Rusetskiy A.M., et al. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya tekhnologicheskikh kompleksov* [Theoretical bases of technological complexes designing]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2012. 239 p. (in Russ.).
- Rusetskiy A.M., et al. *Konstruirovaniye i osnashcheniye tekhnologicheskikh kompleksov* [Design and equipment of technological complexes]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014. 316 p. (in Russ.).
- Rusetskiy A.M., et al. *Avtomatizatsiya i upravleniye v tekhnologicheskikh kompleksakh* [Automation and control in technological complexes]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014. 375 p. (in Russ.).
- Chizhik S.A., et al. *Obespecheniye kachestva izdeliy v tekhnologicheskikh kompleksakh* [Ensuring the quality of products in technological complexes]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2019. 248 p. (in Russ.).
- Vityaz P.A., Kheifetz M.L., Chizhik S.A. "Industriya 4.0": ot informatsionno-kommunikatsionnykh i additivnykh tekhnologiy k samovosproizvedeniyu mashin i organizmov ["Industry 4.0": from information and communication and additive technologies to self-reproduction of machines and organisms]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 2, pp. 54–72 (in Russ.).
- Vityaz P.A., Kheifetz M.L., Chizhik S.A. Sostoyaniye i perspektivy razvitiya tekhnologicheskikh kompleksov additivnogo proizvodstva izdeliy iz kompozitsionnykh materialov [State and development prospects of technological complexes for additive manufacturing of products from composite materials]. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2017, no. 7(73), pp. 42–48 (in Russ.).
- Cherpakov B.I., et al. *Mashinostroeniye. Entsiklopediya. T. IV-7. Metallovezhushchie stanki i derevoobrabatvyayushchee oborudovaniye* [Mechanical engineering. Encyclopedia. Vol. 4–7. Metal-cutting machines and woodworking equipment]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 2002. 864 p. (in Russ.).
- Pronikov A.S., et al. *Proektirovaniye metallovezhushchikh stankov i stanochnykh sistem. T. 1. Proektirovaniye stankov* [Design of metal-cutting machine tools and machine-tool systems. Vol. 1. Machine tools design]. Moscow, Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet im. N.E. Bauman Publ., 1994. 444 p. (in Russ.).
- Vasilev A.S., Dalskiy A.M., Klimenko S.A., Polonskiy L.G., Kheifetz M.L., Yashcheritsyn P.I. *Tekhnologicheskie osnovy upravleniya kachestvom mashin* [Technological fundamentals of machine quality management]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 2003. 256 p. (in Russ.).
- Kheifetz M.L. *Proektirovaniye protsessov kombinirovannoy obrabotki* [Design of processes of combined processing]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 2005. 272 p. (in Russ.).
- Bazrov B.M. *Modulnaya tekhnologiya v mashinostroenii* [Module technology in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 2001. 368 p. (in Russ.).
- Bazrov B.M., Kheifetz M.L. Metod predstavleniya izdeliya kak obekta tsifrovizatsii proizvodstva strukturirovannym mnozhestvom moduley [Method of presenting a product as an object of digitalization of manufacturing by a structured set of modules]. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 377–384 (in Russ.).
- Kheifetz M.L. Ot additivnogo proizvodstva k samovosproizvedeniyu mashin, ikh uzlov i detaley [From additive manufacturing to self-reproduction of machines, their assemblies and parts]. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2017, no. 4(70), pp. 37–48 (in Russ.).
- Vityaz P.A., Kheifetz M.L., Koukhta S.V. *Laser-plasma techniques in computer-controlled manufacturing*. Minsk, Belorusskaya nauka, 2011. 164 p.
- Chizhik S.A., Kheifetz M.L., Filatov S.A. Perspektivy razvitiya tekhnologicheskikh kompleksov additivnogo sinteza kompozitsionnykh materialov i formoobrazovaniya izdeliy [Prospects for development of technological systems for additive synthesis of composite materials and products shaping]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2014, no. 4(29), pp. 68–74 (in Russ.).