

УДК 621.7/620.3

Б.М. БАЗРОВ, д-р техн. наук, проф.
заведующий лабораторией «Теория модульной технологии»¹
E-mail: modul_lab@mail.ru

В.В. СЕРЕБРЕННЫЙ, канд. техн. наук, доц.
ректор²
E-mail: vsereb@stankin.ru

М.Л. ХЕЙФЕЦ, д-р техн. наук, проф.
директор³
E-mail: mlk-z@mail.ru

В.А. ТУРОВЕЦ
директор⁴
E-mail: info@belstanki.by

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Российская Федерация

²Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Российская Федерация

³Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

⁴ОАО «Институт БЕЛОРГСТАНКИНПРОМ», г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 31.10.2023.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАТРОННОГО СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ГИБРИДНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Рассмотрены мировые тенденции и перспективы развития комплексов технологического оборудования. Проведен анализ применяемых стадий и этапов проектирования обрабатывающего оборудования с помощью построения традиционных для механики машин расчетных схем. Предложено технологические станочные комплексы создавать компоновочным синтезом с помощью элементной базы, которая должна содержать функциональные технологические и обслуживающие модули, а служебное назначение станка должно включать номенклатуру изготавливаемых модулей поверхностей. Показано, что перспективы применения потоков энергии для интенсификации процессов обработки должны анализироваться на ранних стадиях проектирования с использованием тепло- и электрофизических критериев для изучения формирующихся связей в системе. Предложено приступить к проектированию мехатронных систем станочных комплексов с анализа структурных связей информационных технологий в гибридном производстве, включающем традиционные и аддитивные технологии.

Ключевые слова: мехатронные системы, гибридные станочные комплексы, традиционные и аддитивные технологии

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-1-66-50-57>

Введение. Совокупность средств производства или производящих машин, включающих технологические, транспортные, энергетические и информационные машины, получила название технологических комплексов. Они функционируют автономно и с использованием программного управления в установленных пределах значений обеспечивают требуемые характеристики качества изделий [1–3].

Комплексы технологического оборудования прошли в своем развитии ряд этапов. По сравнению с универсальным станочным оборудованием современное компьютерно-управляемое производ-

ство, использующее компоненты искусственного интеллекта, позволяет повысить эффективность оборудования в десятки раз при обеспечении все более возрастающих требований к качеству продукции [4–6].

Мировые тенденции развития комплексов технологического оборудования. Началом первого этапа развития технологических комплексов (рисунок 1) можно обозначить автоматизацию 1970-х годов на основе числового программного управления (ЧПУ). В постиндустриальных странах уже с середины 1980-х годов наметился переход от обрабатывающих центров к гибким производ-

ственным системам с элементами интеллектуального производства [7].

Развитие средств микроэлектроники явилось базой для создания мехатронных систем, которые включают как электромеханическую, так и электронно-управляющую части. Мехатронные системы обеспечивают синергетическое объединение узлов точной механики с электротехническими, электронными и компьютерными компонентами с целью проектирования и производства качественно новых комплексов машин с интеллектуальным управлением их функциями [8, 9].

Новые этапы развития гибкой автоматизации производственных систем связаны, прежде всего, с предельной концентрацией средств производства и управления, а также с сокращением сроков конструирования, проектирования, технологической подготовки и изготовления изделий. В результате

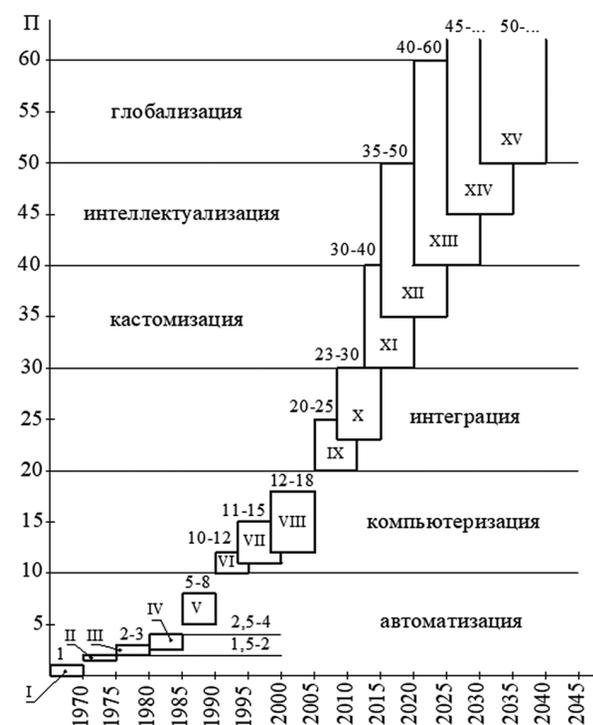


Рисунок 1 — Этапы развития комплексов технологического оборудования: П — производительность оборудования, возрастающая со временем; I — универсальное оборудование с производительностью, принятой за 1; II — оборудование с числовым программным управлением; III — робототехнические комплексы; IV — обрабатывающие 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

Figure 1 — Stages of development of technological equipment complexes: П — equipment productivity increasing with time; I — universal equipment with productivity taken as 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 intelligent production; IX — computer support of product life cycle; X — virtual enterprises; XI — additive manufacturing; XII — internet of things; XIII — machine learning; XIV — artificial intelligence; XV — technology synergy

мехатронные технологические комплексы объединяются в гибридное компактное интеллектуальное производство (Compact Intelligent Manufacture), базирующееся на сочетании различных интенсивных, в том числе и аддитивных, технологий прогрессивного технологического оборудования и интегрированной системы управления [10].

Современный уровень развития информационных технологий в промышленности обеспечил 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). 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 в компьютерной поддержке этапов жизненного цикла продукции [11].

После пространственно-временной интеграции производственных процессов и жизненного цикла изделий следуют этапы, обеспечивающие компактность производства на основе технологий аддитивного производства (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 [12].

Анализ производства и адресной поставки кастомизированных изделий с учетом внешней и внутренней логистики предприятий можно дополнить прогнозом на ближайшее будущее, которое обусловлено новой парадигмой производства, связанной с промышленным интернетом вещей (Industrial Internet of Things) и называемой «Индустрия 4.0».

В основе зарождающихся этапов новой эпохи лежит массовая компьютеризация и глобализация интернета. Дальнейшее развитие производства прогнозируют на базе машинного обучения (Machine Learning) и искусственного интеллекта (Artificial Intelligence). Сочетание робототехники и 3D-печати на основе машинного обучения с интернетом вещей в глобальной сети и искусственным интеллектом уже сегодня позволяют создавать полностью автоматизированные производства [5, 6].

Одновременно с эволюцией производственных технологий идет прогресс биомедицинских технологий, с которыми связывают «Индустрию 5.0». По прогнозам уже после 2025 года носимая человеком электроника начнет замещаться имплантатами,

а в 2030-х годах 3D-принтеры приступят к печати новых органов, и к 2040-м нанороботы начнут ремонтировать организм на клеточном уровне. Предполагают, что к 2035 году люди могут стать «киборгами», напичканными множеством электронных имплантов, а к 2045 году вся планета превратится в один «огромный компьютер», использующий весь людской интеллект [5, 6].

Анализ традиционных стадий и этапов проектирования станочного оборудования. Мехатронные станочные системы включают механическую (кинематическую), электромеханическую (энергетическую), электронную и управляющую (использующую компьютеры и микропроцессоры) части. 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 [8, 9].

Функционально простую мехатронную систему комплекса технологического оборудования можно подразделить на следующие составные части [1, 5]: исполнительные устройства (объект управления и приводы), информационные устройства (датчики внутреннего состояния системы и датчики состояния внешней среды) и систему управления (компьютер и микропроцессоры). 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, управляющими исполнительными устройствами.

При проектировании механической части технологического оборудования, используемого в традиционном и перспективном производстве, применяются как известные, так и новые схемы формообразования и послойного синтеза изделий, а также интенсивные процессы модифицирования материалов концентрированными и распределенными потоками энергии [5, 13].

Традиционно исходные данные для проектирования технологического оборудования содержат техническое задание конкретного заказчика, включающее только:

- данные о материалах и готовых изделиях;
- производительность оборудования;
- характер и тип производства;
- уровень автоматизации и встраиваемость в современное высокотехнологичное производство.

Последовательность проектирования технологического оборудования для производства традиционного типа включает укрупненные стадии, опирающиеся на расчетные схемы:

- компоновка и выбор кинематической схемы;
- модульное построение по ограниченному набору агрегатов и узлов;
- выбор схемы и проведение прочностных расчетов;
- выбор схемы и проведение динамических расчетов;
- выбор термодинамической схемы и расчет температур;
- точностные расчеты геометрических и кинематических связей;
- расчеты надежности и долговечности с экономическим обоснованием ресурса оборудования;
- анализ человеко-машинной системы, включающей охрану труда.

Расчет основных систем технологического оборудования производится по детализированным стадиям для несущих систем, направляющих движений, приводов движений.

Проектирование основных систем технологического оборудования проводится по техническим требованиям, предъявляемым к механическим агрегатам, технологической оснастке и средствам автоматизации, системам смазки и охлаждения, электрооборудованию и программируемым системам, системам диагностики с учетом техники безопасности и эргономики станка.

В первую очередь при проектировании строятся схемы систем с учетом ограничительных наборов агрегатов и узлов. Затем после структурного синтеза проводится параметрическая оптимизация, определяющая основные показатели систем технологического оборудования.

Модульное построение станочного оборудования по ограниченному набору агрегатов и узлов. Чтобы станки были конкурентоспособны, они должны удовлетворять индивидуальным запросам потребителя по своему назначению, реализовывать наиболее производительную технологическую схему обработки и быть способными быстро и надежно перестраиваться при изменении производственной программы выпуска деталей. Эффективно решаться поставленная проблема будет только в том случае, если одновременно будет совершенствоваться технология изготовления деталей.

Традиционная технология изготовления предполагает представление детали совокупностями поверхностей при отсутствии указаний на их функциональные связи. В результате, с целью достижения наибольшей эффективности, на технологических операциях изготавливаются соответственно детали без учета связей их функциональных поверхностей. Например, поверхности, образующие комплект баз — торец, отверстие, шпоночный паз — могут изготавливаться на разных операци-

ях, что приводит к накоплению погрешностей их относительного положения. В результате потребуются дополнительная технологическая операция для устранения погрешностей.

Принимая во внимание эти недостатки традиционной технологии, предлагается воспользоваться модульной технологией, развивающей подходы, используемые как в единичной, так и типовой, а также групповой технологии [14].

В основе модульной технологии лежит представление детали не совокупностью отдельных поверхностей, как это делается на традиционных чертежах, а совокупностью модулей поверхностей (МП), где под МП понимается сочетание поверхностей, объединенных по функциональному признаку.

Все разновидности МП содержат не более тридцати видов, которые можно свести к трем классам: базирующие, рабочие и связующие [14, 15]. В свою очередь, каждый вид МП различается несколькими конструктивными решениями, которые характеризуются набором поверхностей, их относительным расположением, размерами и характеристиками качества.

Главное преимущество МП заключается в их конечном числе, что позволяет представлять любую деталь совокупностью МП из этого ограниченного множества. Поэтому станочное оборудование и технологические комплексы в целом надо создавать не под методы обработки или случайные наборы поверхностей, а под изготовление МП.

Под каждый МП разрабатываются средства их технологического обеспечения, включающие модули технологического процесса (МТО) изготовления МП и, соответственно, станочного оборудования (МО), инструментальной наладки (МИ), приспособления (МПр) и контрольно-измерительного устройства (МКИ). Наличие элементной базы данных на модульном уровне позволяет включать в служебное назначение станка не только перечень изготавливаемых МП, но и модули средств технологического обеспечения: МТО, МО, МИ, МПр и МКИ.

Таким образом, служебное назначение станка должно включать в первую очередь перечень наименований МП с их характеристиками, а также технологии их изготовления.

В итоге потребитель приобретает станок с технологическим сопровождением, что существенно снижает трудоемкость технологической подготовки производства. В результате он может заказывать станок под изготовление требуемой номенклатуры МП. Такие станки должны создаваться методом компоновочного синтеза и иметь возможность перекомпоновки в процессе их эксплуатации. Для решения этой проблемы должна быть сформирована элементная база технологических комплексов, которая будет строиться с использованием принципов модульной технологии.

Любое машиностроительное изделие, в том числе и станки, можно представить совокупностью модулей функциональных технологических (МФТ) и функциональных обслуживающих (МФО). МФТ — модуль, с помощью которого изделие как объект эксплуатации выполняет непосредственно свое служебное назначение. Для того, чтобы МФТ могли выполнять свои функции, необходимы функциональные обслуживающие модули — МФО. Так, у токарного винторезного станка в качестве МФТ выступают трехкулачковый патрон для установки заготовки и резцедержатель для установки инструмента, а в качестве МФО — коробка скоростей со шпинделем, служащая для установки патрона и придания ему вращательного движения, суппорт для установки резцедержателя и коробка подач с ходовым винтом для передачи поступательного движения резцедержателю с инструментом.

В результате применение модульного принципа при создании технологических комплексов позволит более эффективно организовать производство станков и средств их оснащения, создавая специализированные производства МФТ и МФО и сборочные производства в станкоинструментальной отрасли.

Применение потоков энергии для интенсификации процессов обработки. При формировании комплексов технологического оборудования для автоматизированного производства, использующего управление многочисленными приводами, концентрированными и распределенными потоками энергии, традиционных стадий проектирования недостаточно. Связано это с тем, что требуется дополнительно рассматривать схемы технологических модулей и определять параметры оборудования, описывающие как подвод инструмента, так и распределение потоков энергии и материала (рисунок 2).

Создание формы изделия в аддитивных технологиях происходит путем добавления материала с использованием источников энергии, в отличие от традиционных технологий механической обработки, основанных на удалении инструментом «лишнего» материала.

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. 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 подачи материала и энергии [5, 13].

Использование последовательностей критериев переноса для анализа процессов образования структуры материала многократно сокращает

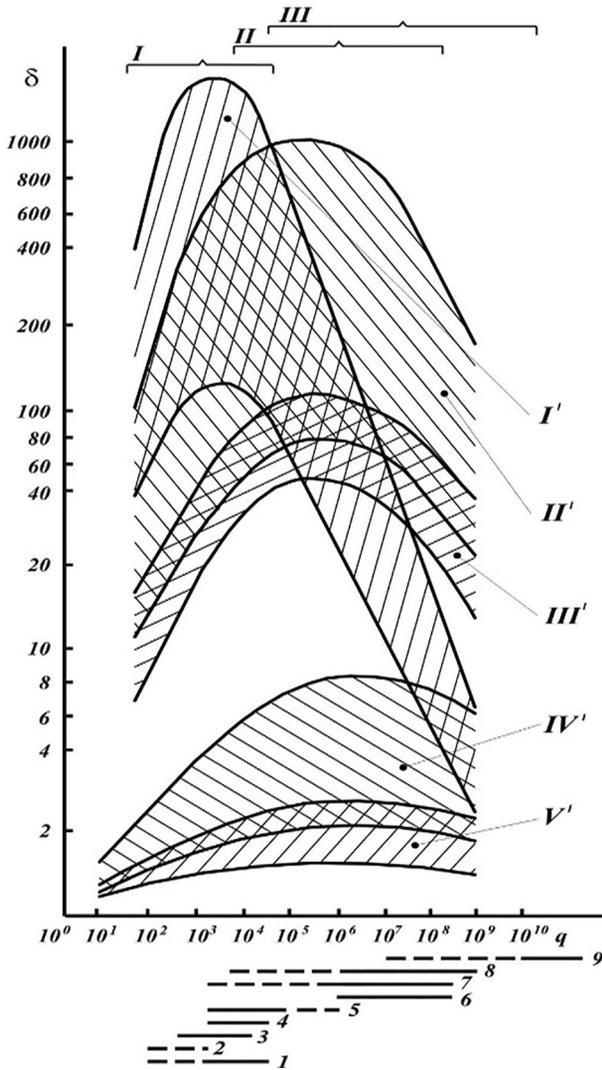


Рисунок 2 — Распределение методов обработки по точности формирования поверхностей (I' — разделение; II' — нанесение; III' — термообработка; IV' — резание; V' — деформирование) в зависимости от уровня концентрации энергии (I — объемная распределенная; II — множество локализованных; III — сфокусированная зоны тепловыделения) при использовании технологических 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 by accuracy of surface formation (I' — separation; II' — application; III' — heat treatment; IV' — cutting; V' — deformation) depending on the level of energy concentration (I — volumetric distributed; II — set of localized; III — focused energy of heat release zones) when using technological 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

объем экспериментальных исследований технологии по формированию поверхностного слоя при термомеханической и электрофизической обработке. Критерии тепломассопереноса устанавливают последовательность структурообразования в обрабатываемом материале при увеличении мощности воздействий. Критерии, характеризующие потоки энергии, при электрофизической

обработке оказывают влияние на последовательность поверхностных явлений и определяют процесс формирования свойств материала [13].

Организация обратных связей при управлении технологическим оборудованием через степени свободы инструментов, частиц наносимого материала и удаляемого слоя посредством дополнительных воздействий потоками энергии позволяет управлять устойчивостью процессов формирования поверхностного слоя. Поэтому с учетом контуров прямых и обратных связей в технологической системе следует выбирать системы числового программного управления и проектировать комплекс технологического оборудования как мехатронную систему [1, 5].

Рассматривая комплекс технологического оборудования с позиций компьютеризации производственной деятельности, его модули, узлы и детали следует проектировать как устройства компьютерной периферии, построенные по той же архитектуре, что и ЭВМ.

Структурные связи информационных технологий в аддитивном производстве. Анализ процессов производства деталей без использования формообразующей оснастки (3D-печати) в зависимости от агрегатного состояния исходного материала, размерности потоков формообразующей среды и последовательности технологических операций [1, 5] позволяет в виде диаграммы структурных связей описывать совокупность методов прямого «выращивания» изделий (рисунок 3 а).

Диаграмма структурных связей представляет собой направленный замкнутый граф и описывает автомат с конечным числом состояний. Вершины графа изображают процессы создания изделий без формообразующей оснастки и представляют логические операции: трансляцию информации (II); движение потоков вещества и энергии (III); запуск (I) и остановку (IV) автоматического цикла [16, 17].

Описание алгоритмами в соответствии с терминами логических операций процессов 3D-печати по диаграмме структурных связей дает возможность анализировать существующие и разрабатывать новые методы прямого «выращивания» изделий [1, 5].

Рассмотрим в качестве примера технологический комплекс для изготовления деталей из листовых материалов (ЛОМ-процесс), включающий:

- установку, содержащую лазер и сканирующее устройство для координации раскроя и резки листовых заготовок;
- манипулятор, обеспечивающий перемещение нарезанных листовых контуров и их укладку в пакет;
- пресс и печь для формования и объемного спекания сформированных деталей;
- систему на базе компьютера, обеспечивающую управление оборудованием технологического комплекса и оптимальный раскрой листа [5, 6].

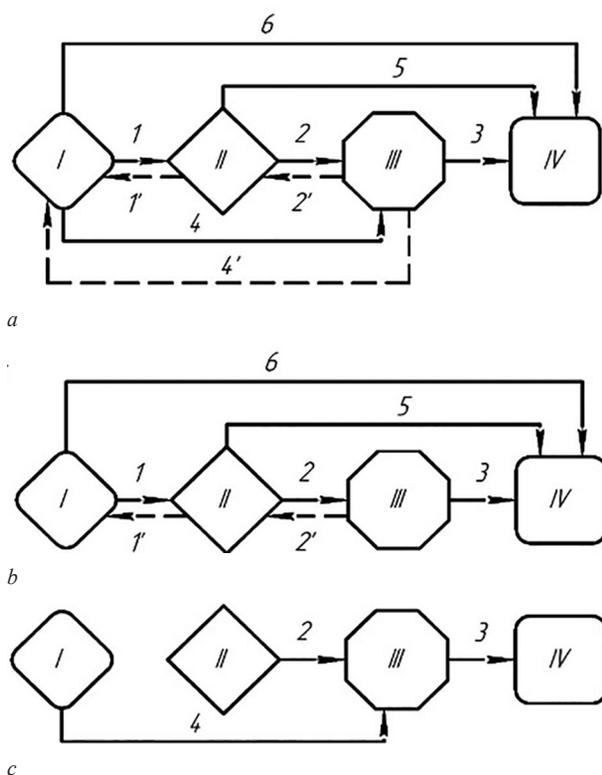


Рисунок 3 — Диаграммы структурных связей технологий в аддитивном производстве (I — прямое получение «выращиванием»; II — послойный «платформенный» синтез; III — оперативное макетирование «прототипирование»; IV — окончательное «3D-формирование» изделий):
a — обобщенная модель методов производства изделий без формообразующей оснастки; *b* — сборка из листовых материалов в LOM-процессе; *c* — синтез лазерным сплавлением порошковых слоев в SLS-процессе
Figure 3 — Diagrams of structural relations of technologies in additive manufacturing (I — direct production by “growing”; II — layer-by-layer “platform” synthesis; III — operational modeling “prototyping”; IV — final “3D forming” of products):
a — generalized model of methods of products manufacturing without forming tooling; *b* — assembly from sheet materials in LOM process; *c* — synthesis by laser fusion of powder layers in SLS process

Поставив в соответствие потокам вещества и энергии формируемую на прессе и в печи деталь, программе воспроизведения — управляющий компьютер, трансляции информации — сканирование лазером, свяжем элементы структуры технологического комплекса движениями манипулятора и рассмотрим все связи, указанные на обобщенной модели (см. рисунок 3 *a*). Из полученной на основе обобщенной модели диаграммы структурных связей технологического комплекса для изготовления детали из листовых материалов (см. рисунок 3 *b*) видно, что отсутствуют связи прессы и печи с лазером и его сканирующим устройством (4 и 4').

Связь (4) прессы и печи с установкой для раскроя и обратная связь (4') (см. рисунок 3 *b*) потребуются в том случае, когда будут соединяться листы из легкоплавких материалов для создания прототипа или листы разнородных материалов, различные по толщине и физико-механическим свойствам. Введение таких связей обеспечит из-

менение интенсивности излучения и позволит управлять глубиной реза и расплавления.

Таким образом, изучение диаграммы структурных связей изготовления деталей из листовых материалов (см. рисунок 3 *b*) позволяет предложить мероприятия по расширению технологических возможностей комплекса за счет создания слоистой детали из разнородных материалов, различных по толщине и физико-механическим свойствам.

Рассмотрим также технологический комплекс для получения деталей путем лазерного спекания порошков (SLS-процесс), содержащий основные функциональные узлы:

- устройство послойной подачи порошка;
- сканирующее устройство лазера;
- устройство послойного прессования порошка;
- основу, снабженную приводом вертикального перемещения [1, 6].

Проведем, используя связи, отмеченные на обобщенной модели, анализ соответствия устройств послойной подачи и прессования порошка потокам вещества и энергии, сканирующего лазерного устройства — программе воспроизведения формируемой детали, основе, перемещаемой приводом — трансляции информации, обеспечивающей самоорганизацию структуры технологического комплекса (см. рисунок 3 *c*). Диаграмма структурных связей производства изделий путем лазерного спекания или сплавления порошковых слоев показывает минимальное число связей между устройствами, обеспечивающими оперативное макетирование. Отсутствуют операции, связанные с программой воспроизведения (1, 5 и 1', 2'); операция, обеспечивающая связь вертикального перемещения формируемого изделия с устройствами послойной подачи и прессования порошка (6); обратная связь основы с этими устройствами (4').

Поэтому технологический комплекс целесообразно дополнить системой, управляющей лазерным сканированием и обеспечивающей избирательное спекание или сплавление различных по толщине и свойствам порошковых слоев путем заданных перемещений и интенсивности лазерного луча. Использование управляющей системы восполнит отсутствующие в структуре связи (см. рисунок 3 *c*).

Таким образом, изучение диаграммы структурных связей получения деталей путем лазерного спекания или сплавления порошковых слоев (см. рисунок 3 *c*) указывает на необходимость использования дополнительного устройства управления по программе воспроизведения детали.

В результате проведенный анализ методов прямого «выращивания» деталей машин показал особую перспективность разработки процессов послойного синтеза с управляемым формированием свойств материала потоками энергии.

Заключение. Анализ стадий и этапов проектирования технологического оборудования, мировых тенденций за последние полвека и перспектив развития на ближайшие десятилетия гибридных мехатронных станочных комплексов показывает, что в Союзном государстве станкостроение в последние десятилетия не развивалось должными темпами. Ставка делалась на приобретение лучших зарубежных образцов оборудования ведущих фирм или станков и средств их оснащения недорогого массового производства от широко известных экспортеров.

В этой связи научное сопровождение развития станкостроения при цифровизации производства в настоящее время становится крайне необходимым и должно строиться на фундаментальной и поисковой основе, совместными усилиями академической, отраслевой и вузовской науки России и Беларуси.

В качестве первоочередных мер предложено создавать технологические станочные комплексы компоновочным синтезом на основе унифицированной для предприятий Союзного государства элементной базы, включающей ограничительные перечни агрегатов и узлов. Элементная база станков должна содержать функциональные технологические и обслуживающие модули, а служебное назначение станка должно включать номенклатуру изготавливаемых модулей поверхностей деталей.

Комплексный анализ проектирования обрабатывающего оборудования с помощью построения традиционных для механики машин расчетных схем показал, что перспективы применения новых технологий, использующих искусственный интеллект, потоки энергии для интенсификации процессов обработки и модифицирования материалов, должны анализироваться на ранних стадиях проектирования.

Предложено приступать к проектированию мехатронных систем станочных комплексов с анализа структурных связей информационных технологий в гибридном производстве, включающем как традиционные, так и аддитивные технологии, и использовать теплофизические и электрофизические критерии для изучения формирующихся связей в технологической системе.

Список литературы

1. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. — Минск: Беларус. навука, 2012. — 239 с.
2. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. — Минск: Беларус. навука, 2014. — 316 с.
3. Автоматизация и управление в технологических комплексах / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого (гл. ред.), П.А. Витязя (зам. гл. ред.), М.Л. Хейфеца (зам. гл. ред.). — Минск: Беларус. навука, 2014. — 375 с.
4. Обеспечение качества изделий в технологических комплексах / С.А. Чижик [и др.]; под общ. ред. М.Л. Хейфеца. — Минск: Беларус. навука, 2019. — 248 с.
5. Хейфец, М.Л. Проектирование мехатронных технологических комплексов для традиционного и аддитивного производства / М.Л. Хейфец // Докл. НАН Беларуси. — 2020. — Т. 64, № 6. — С. 739–746. — DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-739-746>.
6. Перспективные технологии машиностроительного производства / О.П. Голубев [и др.]; под общ. ред. Ж.А. Мрочка, М.Л. Хейфеца. — Новополоцк: Полоцк. гос. ун-т, 2007. — 204 с.
7. Сироткин, О. Технологический облик России на рубеже XXI века / О. Сироткин // Экономист. — 1998. — № 4. — С. 3–9.
8. Мехатроника / Т. Исии [и др.]; пер. с яп. С.А. Масленникова; под ред. В.В. Василькова. — М.: Мир, 1988. — 314 с.
9. Mechatronics – electronics in products and processes / D.A. Bradley [et al.]. — London: Chapman & Hall, 1993. — 376 p.
10. Delchambke, A. Computer-aided assembly planning / A. Delchambke. — London: Chapman & Hall, 1992. — 276 p.
11. Компьютеризированные интегрированные производства и CALS-технологии в машиностроении / Б.И. Черпаков [и др.]; под ред. Б.И. Черпакова. — М.: ВИМИ, 1999. — 512 с.
12. Gibson, I. Additive Manufacturing technologies: 3D Printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. — New York: Springer, 2015. — 498 p. — DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>.
13. Хейфец, М.Л. Проектирование технологических процессов и оборудования, использующих поля и потоки энергии на основе анализа критериев подобия / М.Л. Хейфец, В.С. Крутько, Н.Л. Грецкий // Докл. НАН Беларуси. — 2021. — Т. 65, № 5. — С. 628–635. — DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-5-628-635>.
14. Базров, Б.М. Модульная технология в машиностроении / Б.М. Базров. — М.: Машиностроение, 2001. — 368 с.
15. Базров, Б.М. Метод представления изделия как объекта цифровизации производства структурированным множеством модулей / Б.М. Базров, М.Л. Хейфец // Докл. НАН Беларуси. — 2019. — Т. 63, № 3. — С. 377–384. — DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-377-384>.
16. Фон Нейман, Дж. Теория самовоспроизводящихся автоматов / Дж. фон Нейман; пер. с англ. В.Л. Стефанюка; под ред. В.И. Варшавского. — М.: Мир, 1971. — 382 с.
17. Винер, Н. Кибернетика или управление и связь в живом и машине / Н. Винер; пер. с англ. — М.: Совет. радио, 1958. — 296 с.

BAZROV Boris M., D. Sc. in Eng., Prof.
Head of the Laboratory “Modular Technology Theory”¹
E-mail: modul_lab@mail.ru

SEREBRENNY Vladimir V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.
Rector²
E-mail: vsereb@stankin.ru

KHEIFETZ Mikhail L., D. Sc. in Eng., Prof.
Director³
E-mail: mlk-z@mail.ru

TUROVETS Vladimir A.

Director⁴

E-mail: info@belstanki.by

¹Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation²Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, Russian Federation³Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus⁴JSC "Institute of BELORGSTANKINPROM", Minsk, Republic of Belarus

Received 31 October 2023.

PROSPECTS OF DESIGN AND APPLICATION OF MECHATRONIC MACHINE TOOL EQUIPMENT IN HYBRID MANUFACTURING

World trends and prospects of development of technological equipment complexes are considered. The applied stages and phases of machining equipment design are analyzed by means of constructing design schemes traditional for machine mechanics. It is proposed to create technological machine tool complexes by layout synthesis with the help of element base, which should contain functional technological and service modules, and the service purpose of the machine tool should include the nomenclature of manufactured surface modules. It is shown that the prospects of application of energy flows for intensification of machining processes should be analyzed at the early stages of design, using thermal and electrophysical criteria to study the emerging relations in the system. It is suggested to start designing mechatronic systems of machine tool complexes from the analysis of structural relations of information technologies in hybrid production including traditional and additive technologies.

Keywords: mechatronic systems, hybrid machine tool complexes, traditional and additive technologies

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-1-66-50-57>

References

- Rusetskiy A.M., et al. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya tekhnologicheskikh kompleksov* [Theoretical foundations for the design of technological complexes]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2012. 239 p. (in Russ.).
- Rusetskiy A.M., et al. *Konstruirovaniye i osnashcheniye tekhnologicheskikh kompleksov* [Design and equipment of technological complexes]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2014. 316 p. (in Russ.).
- Rusetskiy A.M., et al. *Avtomatizatsiya i upravleniye v tekhnologicheskikh kompleksakh* [Automation and control in technological complexes]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2014. 375 p. (in Russ.).
- Chizhik S.A., et al. *Obespecheniye kachestva izdeliy v tekhnologicheskikh kompleksakh* [Quality assurance of products in technological complexes]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2019. 248 p. (in Russ.).
- Kheifetz M.L. *Proektirovaniye mekhatronnykh tekhnologicheskikh kompleksov dlya traditsionnogo i additivnogo proizvodstva* [Design of mechatronic technological complexes for traditional and additive manufacturing]. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 739–746. DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-739-746> (in Russ.).
- Golubev O.P., et al. *Perspektivnyye tekhnologii mashinostroitel'nogo proizvodstva* [Advanced technologies of engineering production]. Novopolotsk, Polotskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2007. 204 p. (in Russ.).
- Sirotkin O. *Tekhnologicheskyy oblik Rossii na rubezhe XXI veka* [Technological appearance of Russia at the turn of the 21st century]. *Economist*, 1998, no. 4, pp. 3–9 (in Russ.).
- Ishii T., et al. *Mekhatronika* [Mechatronics]. Moscow, Mir Publ., 1988. 314 p. (in Russ.).
- Bradley D.A., et al. *Mechatronics – electronics in products and processes*. London, Chapman & Hall, 1993. 376 p.
- Delchambke A. *Computer-aided assembly planning*. London, Chapman & Hall, 1992. 276 p.
- Cherpakov B.I., et al. *Kompyuterizirovannyye integrirovannyye proizvodstva i CALS-tekhnologii v mashinostroenii* [Computerized integrated production and CALS technologies in mechanical engineering]. Moscow, VIMI Publ., 1999. 512 p. (in Russ.).
- Gibson I., Rosen D., Stuker B. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. New York, Springer, 2015. 498 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>.
- Kheifetz M.L., Krutko V.S., Gretskiy N.L. *Proektirovaniye tekhnologicheskikh protsessov i oborudovaniya, ispolzuyushchikh polya i potoki energii na osnove analiza kriteriev podobiya* [Design of the technological process and equipment using fields and energy flows based on analysis of similarity criteria]. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 5, pp. 628–635. DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-5-628-635> (in Russ.).
- Bazrov B.M. *Modul'naya tekhnologiya v mashinostroenii* [Modular 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. DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-377-384> (in Russ.).
- Von Neumann J. *Theory of self-reproducing automata*. Urbana, London, University of Illinois Press, 1966.
- Wiener N. *Cybernetics or control and communication in the animal and the machine*. New York, The Technology Press John Wiley & Sons, Inc., 1948.