

**Ключевые слова:**

научно-технический прогресс, эффективность, проектирование, технологическое оборудование, мехатронные и адаптронные системы

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ: СИСТЕМНЫЕ ПРИНЦИПЫ

ЧАСТЬ 1

Александр КУЗНЕЦОВ

Рассмотрены механизмы повышения эффективности создания нового, более прогрессивного и инновационного, технологического оборудования на базе анализа циклов эволюционного процесса развития технологических способов производства в соотношении с непрерывным совершенствованием конструкций станков, их компонентов и подсистем.

Развитие научно-технического прогресса в области материального производства определяется и обусловливается применением научных и технических достижений, которые базируются на изучении физических процессов, явлений, систем и структур, способов, форм и видов их взаимодействий, приводящих к созданию новых технологических принципов, более эффективных технологий, машин, оборудования, а также совершенствованию и развитию существующих методов и способов производства изделий. Поэтому их развитие принципиально возможно в двух направлениях: совершенствование и создание нового предмета и его свойств; совершенствование и создание новых технологий производства. Очевидно, выбор первого направления развития является в длительной перспективе менее эффективным и конкурентоспособным, так как новый предмет и его свойства (очевидное и обозримое множество) достаточно быстро воспроизводятся существующей технологией, а выбор развития по второму направлению более эффективен и конкурентоспособен, так как его воспроизводство менее очевидно и достижимо в ближайшей перспективе в силу множества параметров и характеристик, формирующих и обуславливающих создание новой технологии. Конечно, исходя из рассмотрения развития как системы, существует и третье направление (требует существенно больше необходимых ресурсов для развития) как комбинация двух названных, но при выборе приоритета (при ограниченных ресурсах) развития предпочтение отдается второму.

В настоящее время создано большое число производственных способов обработки, получения и формирования деталей и изделий, технологических процессов и оборудования для их осуществления. Тенденции повышения производительности, точности, надежности, гибкости, экономичности и эффективности как производственного и технологического оборудования, так и систем машин, создание производств со все меньшим участием человека, потребность в разработке перестраиваемых и перенастраиваемых производств на базе оборудования с переменной структурой, с широким спектром технологических методов воздействия на объект производства требуют создания новых системных методов анализа для реализации указанных задач и создания новых конструкций, в полном объеме реализующих различные физические процессы. Несмотря на давнюю историю машиностроения, на практике удалось внедрить небольшое число технологических методов, реализуемых технологическим и металлообрабатывающим оборудованием.

В машиностроении 80–85% затрат предопределяется техническими решениями, которые формируются в процессе конструирования и разработки технологий. Важность проблемы повышения эффективности конструирования иллюстрируется следующими данными: производительность труда в производстве за 20 век возросла на 1500%, а в проектировании – на 40–50%; сложность промышленных изделий (оцениваемых по числу дета-

лей) возрастала каждые 15 лет в два раза; затраты времени на создание новых изделий уменьшались каждые 25 лет в два раза; число классов технических систем удваивалось каждые 10 лет.

Последовательное развитие машин определяет эволюцией технологических способов производства и сопровождается длительным и непрерывным совершенствованием конструкций, то есть еще до завершения работ над машинами одного поколения формулируются задачи, связанные с дальнейшим их развитием и обновлением. Переход к новому технологическому оборудованию, изделию происходит при следующих наиболее вероятных циклах исчерпания возможностей конструкции:

1. при неизменном принципе действия улучшаются параметры, характеристики, свойства технического объекта (оборудования, машины) до приближения их к оптимальным или эффективным;
2. после исчерпания возможностей улучшения по циклу 1:
 - ✓ происходит переход к более рациональной структуре, после чего развитие опять идет по циклу 1;
 - ✓ до приближения параметров, характеристик, свойств технического объекта этой структуры к глобальному экстремуму или пределу для данного принципа действия;
3. после исчерпания возможностей циклов 1 и 2 осуществляется переход к созданию технического объекта на другом принципе или физической природе действия.

Развитие технологического объекта по описанному сценарию иллюстрируется так называемой S-образной кривой (рис. 1а). Это развитие происходит до уровня K_x предельных показателей, параметров, характеристик, свойств, а также возможностей применяемого физического принципа действия. В моменты T_A и T_B появляется новый технологический объект на одном и том же физическом принципе действия. Возможности развития определяются расстоянием от K_x до K_A и K_B , то есть степенью достижения предельного уровня. Очевидно, что изделие В улучшать не имеет большого технического и экономического смысла и нужно переходить на другой принцип его действия, так как время (затраты) на развитие $T_x - T_B$ от уровня K_B до K_x существенно превышает изменение достигаемого эффекта ($K_x - K_B$), в отличие от предыдущих соотношений затрат (времени) $T_B - T_A$ и изменения ($K_B - K_A$) в получаемом эффекте.

Таким образом, эволюция развития достижимых показателей, параметров, характеристик технологического оборудования обусловлена, в первую очередь, требованиями, потребностями и направлениями развития общества и, в частности, промышленности. Это

определяет и необходимый (для этого уровня развития технологий, техники, требований к ее деталям, узлам, механизмам, устройствам и системам) потенциал технологий и процессов и используемые ими физические принципы и явления, уровень их совершенства и др. Следовательно, учитывая изложенное, представляется возможным представлять процесс изменения (эволюцию) достижимых показателей, параметров, характеристик технологического оборудования в соответствии с рис. 1б, обосновывающим развитие с применением различных физических принципов создания машин, реализующих те или иные технологии, положенные в основу их функционирования.

Научной основой создания новых технологий служат:

- открытие и использование неизвестных ранее физических процессов и явлений и их физико-химических механизмов воздействия на материал; на практике это приводит к разработке новых высоких технологий с уникальными возможностями;
- непрерывное совершенствование широко применяемых в промышленности методов, способов и средств обработки в следующих направлениях: разработка технологического оборудования и устройств с расширенными функциональными возможностями; совершенствование конструкций инструментов и материалов; улучшение технологических свойств обрабатываемых материалов; оптимизация параметров; использование дополнительных источников энергии и др.;
- познание новых, ранее неизученных или неизвестных процессов и явлений, физического механизма того или иного метода.

Вместе с тем, поиск и создание новых технологий носят, в основном, спонтанный характер и связаны, как правило, с работами, вызванными необходимостью решения конкретных практических задач. Большое количество наработок в области современных технологий нуждается в систематизации и создании научно-методической основы, позволяющей правильно оценить место и перспективность каждого отдельного достижения, наметить новые направления исследований.

Развитие технологического оборудования (рис. 1а, б) идет в направлении роста (приближения к технической идеальности) их полезных характеристик и свойств (мощности, производительности, точности, жесткости, прочности и т.п.) с одновременным снижением потерь при функционировании (трение, износ, скорость, потеря времени и т.д.) и затрат (вес, трудоемкость, габариты и т.п.) на их производство. В то же время, относительные показатели технологического оборудования (КПД, эффективность, надежность) и удельные показатели определяют обобщенные или интегральные свойства. Техниче-

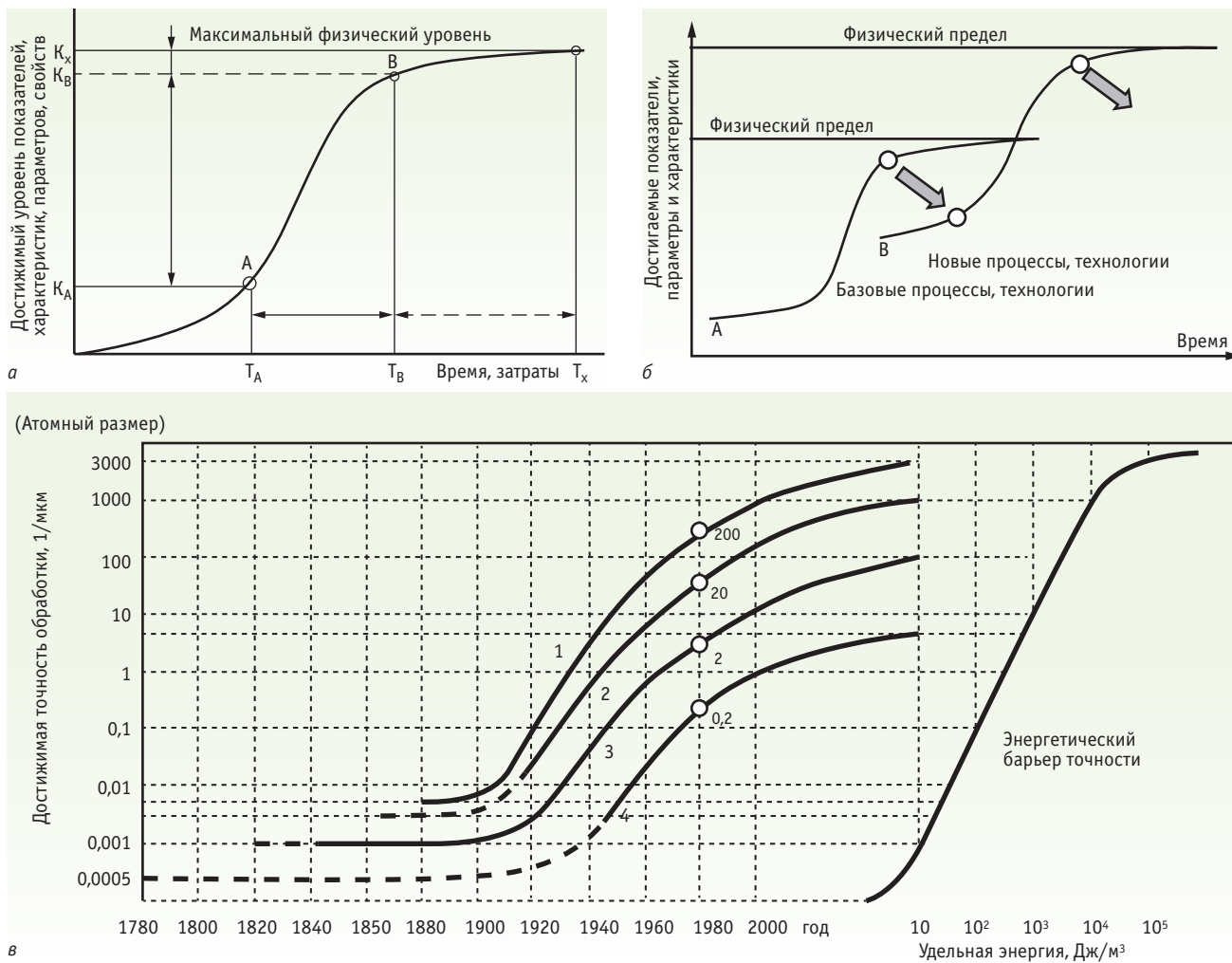


Рис. 1. Схема эволюционного развития: а – технологического оборудования, б – новой технологии и оборудования, в – пример эволюции развития достижимой точности металлообрабатывающих станков

ские характеристики и свойства изделий, особенно средств производства, являются главной и наиболее важной частью, определяющей их полезность и, соответственно, эффективность, конкурентоспособность и прогрессивность.

Технологические и технические совершенствования (рис. 1а), в общем случае, могут относиться либо к оптимизации на уровне процесса и развитию совершенства технических систем и компонентов, либо к фундаментальному изменению на системном уровне. Оптимизация характеризуется адаптацией отдельных процессов под конкретные задачи посредством настройки элементов системы или функций в пределах рабочих параметров и характеристик процесса, так что становится возможным реализовать оптимальные показатели, например производительность, энергоэффективность. Фундаментальные системные изменения характеризуются заменой или добавлением элементов или подсистем в структуру построения оборудования как системы, в то время как совершенствование отдельных

технических систем и компонентов обуславливает их модернизацию и развитие без изменения принципов работы и внутренней структуры.

Например, этапы развития станков с ЧПУ характеризуются переходом от традиционных (достаточно совершенных) кинематических цепей к модульному принципу построения структур станков на базе мехатронных модулей, которые становятся функционально совмещенными с исполнительными органами станков, а далее к адаптронным системам, которые активно начинают применяться. Это обусловлено соединением в них трех начал – энергетического, информационного и управляющего, что определяет получение принципиально новых конструкторских решений (рис. 2).

Термин «адаптроника» (adaptronics) подразумевает использование в качестве датчиков так называемых «умных материалов», на основе применения которых построены актуаторы (приводы). В качестве таких материалов находят применение сплавы

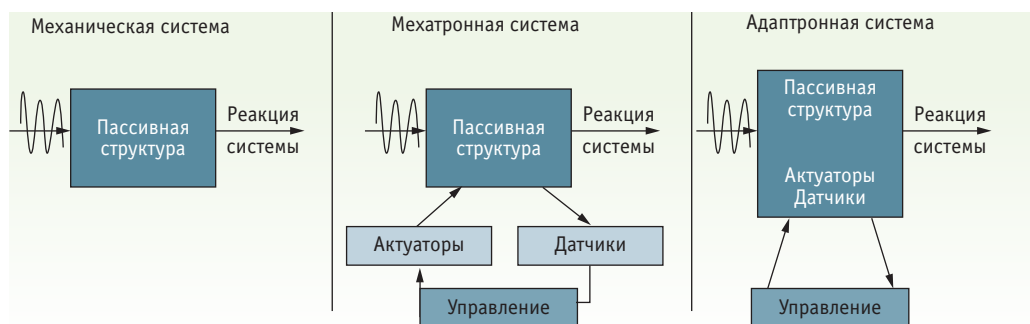


Рис. 2. Принципиальные схемы структуры механической, мехатронной и адаптронной систем

с памятью формы и магнитострикционные, пьезо-керамика, электрореологические жидкости, то есть осуществляется интеграция в саму механическую или мехатронную структуру функций автоматического получения информации о характеристиках движения и форме его осуществления.

Мехатронные системы (рис. 2) обычно состоят из самостоятельных, отдельных элементов: привода, датчика и управления функциями. В адаптронных системах эти важные элементы скорее аффилированы, так как применяемые «умные материалы» не просто неотъемлемая часть системы, а являются частью структуры, которая сочетает в себе сенсорные, приводные и механические функции.

Каждый раз, когда прогресс совершенства отдельных технических систем и компонентов, предназначенных для реализуемой в оборудовании технологии, уже не может обеспечить значительный рост показателей, на смену существующему оборудованию приходит новое, обладающее более совершенной структурой и конструкцией, с другими, более эффективными, параметрами и характеристиками. Это дает новый толчок развитию, которое будет продолжаться до тех пор, пока и новая машина не исчерпает себя.

Таким образом, развитие технологического оборудования есть сочетание непрерывного прогресса отдельных технических систем и компонентов с периодическими революционными преобразованиями структуры и конструкции. В период этого процесса совершенствования и развития зарождается потребность не только в совершенствовании реализуемой оборудовании технологии с лимитом ее физического потенциала, но и в проведении работы по нахождению технологий с такой же целевой функцией, но реализующих иные физические принципы с более высоким пределом достижимых параметров и характеристик (рис. 1б).

Следовательно, с технологической точки зрения, *идеальным* для реализуемого физического процесса будет считаться оборудование непрерывного действия с максимальным использованием возможностей технологии (реализуемого физического процесса), а любая дискретизация оборудовании его технологической функции является частным (более или менее совершенным) решением, поэтому следует

искать пути всемерного сокращения избыточных функций по отношению к реализуемому физическому процессу (технологии) и приближаться к максимальной непрерывности действия.

При оценке прогрессивности новой техники должен учитываться фактор времени с сопоставлением фактических и экономически допустимых или общественно необходимых темпов роста параметров, характеристик и показателей. Любая самая современная техника сегодняшнего дня, если сроки ее проектирования, создания и освоения чрезмерно затягиваются, оказывается морально устаревшей еще до ввода в эксплуатацию. Любая техника не может оставаться прогрессивной вечно и рано или поздно морально устаревает даже при сохранении своих технических параметров. Прогрессивность новой техники должна оцениваться сопоставлением уровня показателей эффективности, достигаемых посредством различных технических решений.

Для создания нового, более прогрессивного и инновационного технологического оборудования необходимо не только обеспечить структурные (жесткость, прочность, динамическая устойчивость, пространство обработки и т.п.) и функциональные возможности (функции формообразования, управления, контроля и т.п.), основанные на принципах проектирования машин, но и быстро внедрять передовые технологии, материалы и компоненты, разрабатывать новые технологии в области машиностроения. Технологическое оборудование интегрирует в себе технологии, связанные с различными областями научных знаний (табл.1), а также результаты, относящиеся к широкому спектру научных дисциплин: механике, физике твердого тела, электронике, мехатронике, инженерному проектированию, метрологии, технологическому проектированию, информатике и др. Взаимосвязь областей знаний, научно обоснованных и практически апробированных решений (рис. 3) обуславливают возможность обеспечения требований, предъявляемых к технологическому оборудованию промышленностью.

Область знаний (рис. 3) содержит и определяет методы описания поведения, состояния, структуры и свойств процесса объекта проектирования. Применительно к технологическому оборудованию, в том числе металлорежущим станкам, такими объектами

Таблица 1. Взаимосвязь знаний при создании технологического оборудования

Детали, узлы и системы оборудования	03 Область знаний					03 0T 0P
	Механика	Механика сплошной среды	Физика твердого тела	Информатика	Математика	
Неподвижные		+	+		+	Область решений 0P
Подвижные	+	+	+	+	+	
Функциональные	+			+	+	
	0T Область требований					

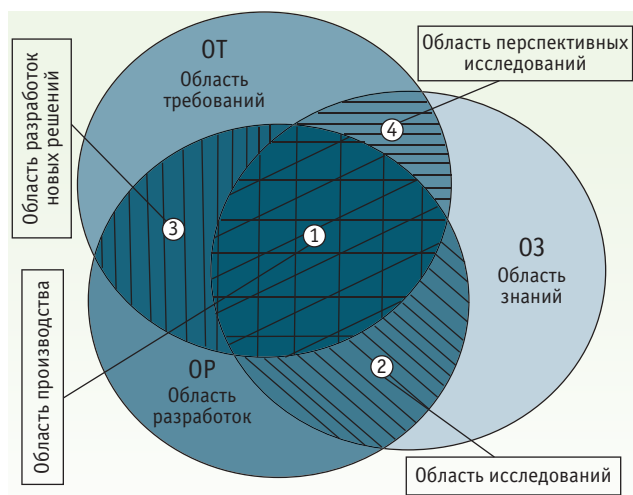


Рис. 3. Схема оценки уровня состояния и принципов создания новых технологических машин

рассмотрения являются детали, узлы и системы структуры проектируемого оборудования, которые укрупненно можно разделить на неподвижные, подвижные и функциональные.

Для создания станков, которые смогут удовлетворить будущие запросы промышленности, потребуются не только точно описать ситуацию для развития станкостроения, но и провести научный анализ различных явлений, возникающих при эксплуатации

станков. На рис. 4 показано место станкостроения как науки, которая интегрирует в себе различные научные области знаний. В области станкостроения имеется множество старых проблем, помимо которых возникают новые задачи исследований, например применение новых материалов в структуре станков или разработка новых датчиков, приводов с новыми принципами действия и т.п.

Для получения новой структуры станка необходимо проведение следующих мероприятий: проектирование «идеальной» структуры; устранение или изоляция источников потерь и погрешностей во всей структуре; минимизация количества источников погрешностей; контроль и управление источниками погрешностей и т.д. Для новых станков требуется использовать все большее количество датчиков и систем с улучшенными характеристиками. По этой причине при помощи методов мехатроники и адаптроники производится разработка элементов станков. Систематизация знаний в области станкостроения позволяет значительно повысить уровень инженерных навыков, необходимых для разработки инновационных станков.

Область требований (см. рис. 3) содержит и определяет параметры, характеристики и свойства объекта рассмотрения и проектирования, его структурных частей и элементов конструкции, обусловленные требованиями промышленности (рис. 5).

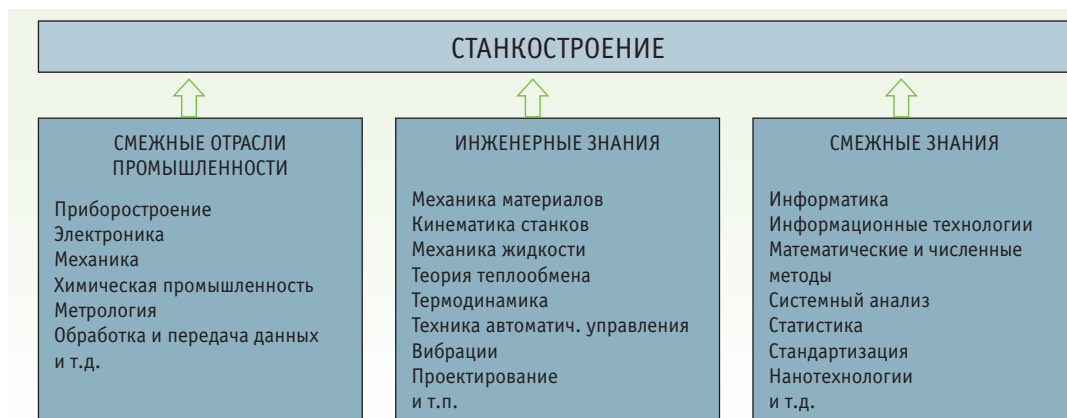


Рис. 4. Область знаний в структуре станкостроения

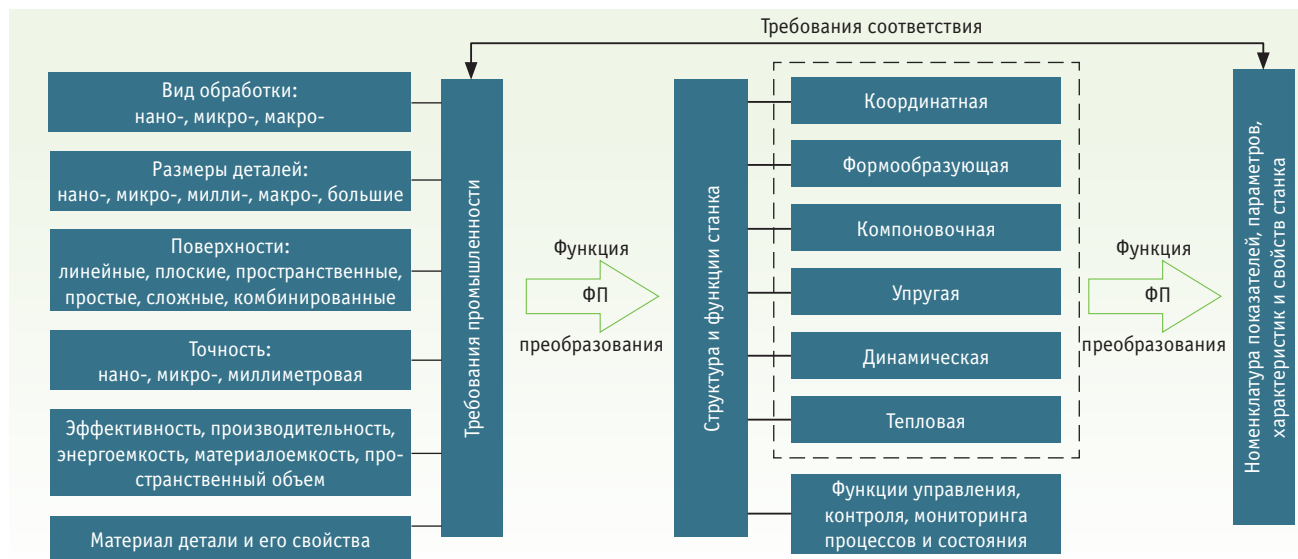


Рис. 5. Схема обеспечения требований при проектировании станков

Тогда, при проектировании технологического оборудования требуется определить наилучшие из возможно достижимых значения показателей, параметров, характеристик и свойств объекта проектирования, структура элементов которого и их отношения формируют систему с заданными функциями и поведением. Взаимосвязи требований и выходных показателей станка приведены в табл. 2, где знаком «+» показано влияние составляющих структуры станка и их параметров и характеристик, которые формируют показатели через функции преобразований ФП требований потребителя в выходные показатели, которые определим как:

- точность – степень соответствия свойств предмета, объекта, системы, процесса, явления его номинальному, заданному, установленному, допустимому, идеальному значению или закону;
- производительность – скорость изменения параметров, характеристик, свойств, состояния, структуры преобразуемой материи;
- эффективность – степень использования какого-либо ресурса.

Значения показателей и соответствующие им классы станков приведены в табл. 3.

Анализ характеристик производителей станков позволил их систематизировать по двум группам (табл. 4): обычного (стандартного) назначения и станков для высокоскоростной обработки. Это, с одной стороны, позволяет судить о количественной оценке использования машинного времени, а с другой стороны, дает возможность увидеть тенденции в изменении рассматриваемых параметров.

Повышение скоростей и других параметров и характеристик требует значительного и постоянного увеличения энергетических затрат. Прогресс в создании новых инструментальных материалов позволяет существенно повысить скорости резания при обработке металлов на металлорежущих станках. Появился новый вид станков для высокоскоростной обработки HSC (High Speed Cutting). На рис. 6 приведены области скоростей резания, которые требуется обеспечить на станках для этих видов материалов.

Это приводит к изменению требований к создателям и производителям станков, изменению видов и разнообразию их конструкций, которые становятся все более адаптируемыми к требованиям потребителей.

Таблица 2. Основные выходные показатели технического уровня станков

Функциональная структура станка	Точность	Производительность	Эффективность
Упругая	+	+	+
Динамическая	+	+	+
Тепловая	+	(+)	+
Формообразующая и кинематическая	+		+
Компоновочная	(+)		+
Управление, контроль, мониторинг			+

Таблица 3. Классы оборудования по уровню эффективности

Класс ресурсо-эффективности	Наименование класса ресурсо-эффективности	Значение класса энергоэффективности E_e^e	Значение класса эффективной производительности E_e^m	Значение класса эффективной точности E_e^i	Значение класса ресурсо-эффективности E_{re}
1	1,00–0,95	1,00–0,95	1,00–0,95	1,00–0,86	1,00–0,95
2	0,949–0,9	0,949–0,9	0,949–0,9	0,85–0,73	0,949–0,9
3	0,899–0,85	0,899–0,85	0,899–0,85	0,72–0,62	0,899–0,85
4	0,849–0,8	0,849–0,8	0,849–0,8	0,61–0,52	0,849–0,8
5	0,799–0,75	0,799–0,75	0,799–0,75	0,51–0,43	0,799–0,75
6	0,749–0,65	0,749–0,65	0,749–0,65	0,42–0,28	0,749–0,65
7	0,649–0,5	0,649–0,5	0,649–0,5	0,27–0,13	0,649–0,5

Таблица 4. Эксплуатационные характеристики станков

Наименование параметра	Обычные (стандартные) станки	Высоко-скоростные станки
Время смены детали, с	5–10	<4
Линейная скорость перемещений, м/мин	<20	40–60>
Угловая скорость, град/с	130–140	320–330
Линейное ускорение, м/с ²	<1,5	6–7
Время смены инструмента, с	3–5	<1
Скорость вращения шпинделя, мин ⁻¹	<10 000	>15 000

Поэтому хороший процесс проектирования – эффективный процесс структурирования по элементам:

- **требования потребителя** – высокий технический уровень;
- **функциональные требования** (чего мы хотим достигнуть) – обеспечить заданный (требуемый потребителями) технический уровень с заданной номенклатурой показателей;
- **параметры проектирования** – чем и какими параметрами и характеристиками объектов структуры станка обеспечить заданный технический

уровень и удовлетворяются функциональные требования;

→ **область процессов изготовления** – обоснование параметров обеспечения выбранного технического уровня.

Проектирование – это взаимодействие между «чего мы хотим достигнуть?» и «как мы достигаем этого?». Проектировщик пытается получить то, что он хочет достигнуть через соответствующее взаимодействие между обеими сторонами для удовлетворения ответов на эти вопросы.

В процессе принятия решения при создании станка, удовлетворяющего схеме, приведенной на рис. 5, осуществляются два ключевых этапа проектирования. Сначала мы должны разработать и создать структуру станка, которая удовлетворит требованиям выполняемых функций, путем разработки приемлемого набора параметров и характеристик структуры. Второй шаг – это необходимость обеспечить эти параметры составляющих структуры станка, которые обуславливаются и определяются возможным или достигаемым уровнем производства и/или существующей областью решений.

Другими словами, требования промышленности (рис. 5) преобразованы (ФП) в функциональные требования и структуру станка и далее иным преобразованием (ФП) в параметры и характеристики частей,

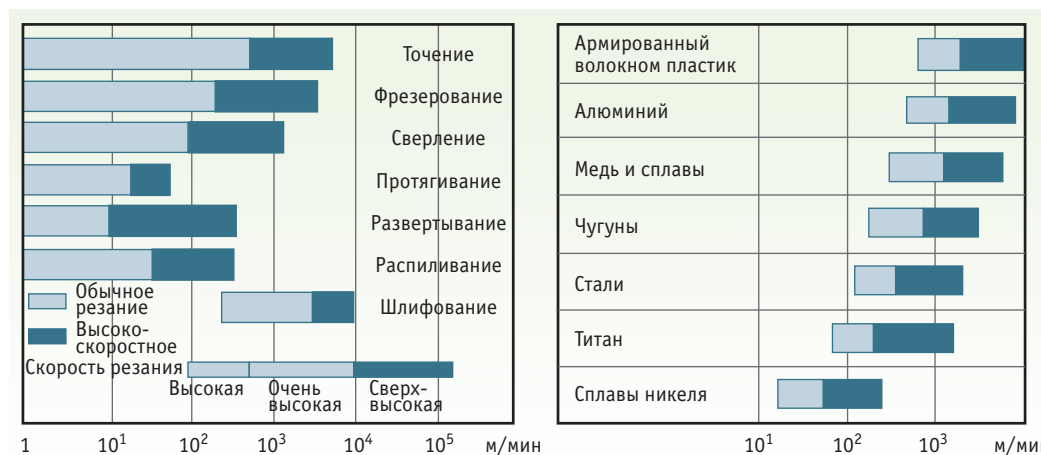


Рис. 6. Границы скоростей резания для видов резания и обрабатываемых материалов

систем, подсистем и станка в целом. Этот процесс должен носить параллельный зигзагообразный характер для удовлетворения сбалансированных интегральных или глобальных показателей.

Перечень и эволюция возникновения наиболее применяемых и эффективных методов проектирования машин и технологического оборудования приведен в табл. 5. Конкретные методы конструирования всегда индивидуальны, поэтому очень трудно формулировать рекомендации по их применению. Паркинсон С.Н. сказал, что «верблюд — это коллективно спроектированная лошадь», имея в виду, что коллектив не заменит творчески одаренного конструктора при решении конкретных задач.

Схема создания техники представляется следующей последовательностью:

потребность → функция → концепция → проектирование → производство → эксплуатация, испытания → проблемы, задачи → исследования, научно-технический задел → технический и технологический скачок → потребность → функция (рис. 7).

Этапы потребность → функция → концепция приводят к формированию структуры станка, методы формирования которой приведены в табл. 6.

Образы пространственных компоновочных структур металлорежущих станков на основе модулей движения/положения приведены на рис. 8.

Технологическое оборудование и системы нуждаются не в последовательном, а в параллельном, интегрированном методе проектирования. Результатом такого методологического проектирования должно стать обеспечение оптимальной комбинации критериев, параметров и характеристик, вовле-

Таблица 5. Методы проектирования оборудования

№ п.п.	Год	Автор (ы)	Наименование метода
1		Неизвестен	Проб и ошибок
2	1942	М. Герцшпрунг, Й. Рассел, Ф. Цвикки	Многомерные таблицы
3	1968	М. Берталаффи	Общая теория систем
4	1971	Г.С. Альтшуллер	ТРИЗ
5	1970	Д. Хилл	Матрица идей
6	1977	И. Росс	Объектно-ориентированное проектирование
7	1981	Дж. Стeward	Матричная структура проектирования
8	1987	Г. Тагучи	Метод качественного инженерного проектирования
9	1990, 2001	Н. П. Су	Аксиоматика проектирования
10	1995	И. Хатамура	Концептуальное проектирование
11	2003	Б. Хайк	Проектирование методом шесть сигма
12	2019	С. Ли, Д. Ли, Х. Чо, К. И. Канга	Объединение методов структурирования функции качества (QFD) и ТРИЗ

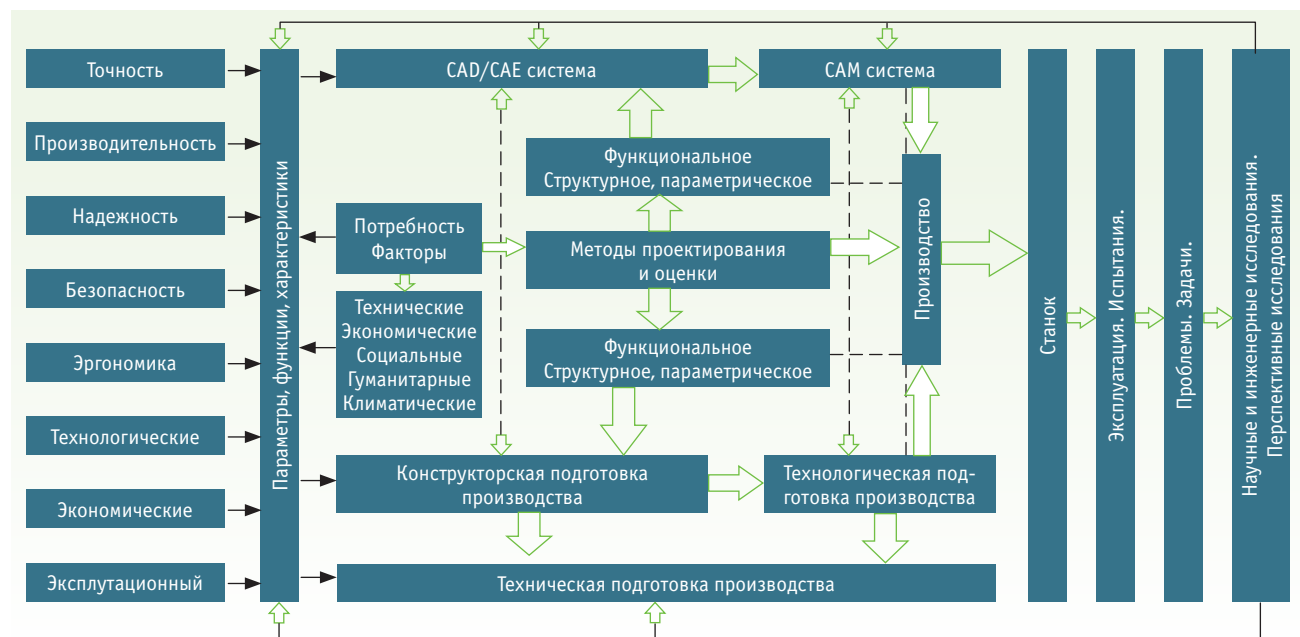


Рис. 7. Схема создания и развития технологического оборудования

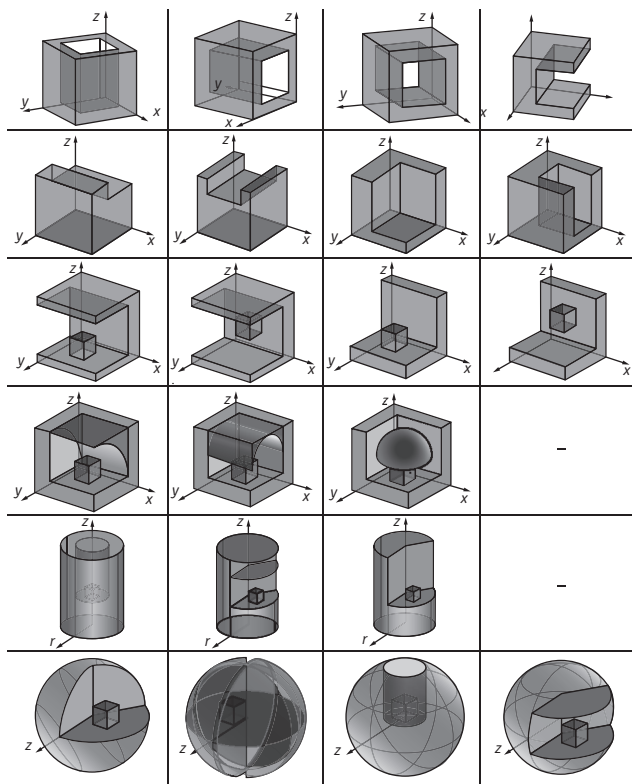


Рис. 8. Примеры образов пространственных компоновочных структур металлорежущих станков

ченных в процесс и вычисления. Другими словами, это проектирование, у которого есть самое высокое глобальное чувство удовлетворения качества.

Область решений содержит и определяет фактически достигнутые или возможно достижимые параметры, характеристики и свойства объекта рассмотрения и проектирования, его структурных частей и элементов конструкции на период времени создания объекта (станка).

Рассмотрим **области решений** для металлорежущих станков на примерах приводов перемещений узлов станка и приводов главного движения – шпиндельных узлов.

Одной из ключевых проблем в области мехатронных систем является управление движением исполнительных органов, несущих инструмент и заготовку. Конструкция механической части привода зависит от вида реализуемого перемещения (поступательное или вращение) и включает в себя перемещаемый узел (рабочий орган), тяговое устройство, муфту, а при недостаточном крутящем моменте двигателя в механической части привода – редуктор. Принципиальные структурные схемы (область решений) построения приводов линейных перемещений металлорежущих станков приведены на рис. 9.

Сравнительные параметры и характеристики типовых приводов линейных перемещений приведены

Таблица 6. Методы описания компоновочных структур станков

Автор	Публикация		
	Год	Наименование	
Врагов Ю.Д.	1978	Анализ компоновок металлорежущих станков (основы компонентетики)	
Решетов Д.Н., Портман В.Т.	1986	Точность металлорежущих станков	
Shinno H., Ito Y.	1982	Generation method for structural configuration of machine tools-variant design using directed graph	
Хомяков В.С. Давыдов И.И.	1989	Кодирование компоновок металлорежущих станков при их автоматизированном проектировании	
Bohez E.L.J.	2002	Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis	
Chen F.-C.	2001	On the structural configuration synthesis and geometry of machining centres	
Кузнецов А.П.	2015	Структуры процессов и оборудования для обработки резанием. Часть 4. Структуры оборудования обработки резанием	

Принцип	Структура, формула или код компоновки
<p>Способ обозначения компоновок: K_1 – координатная; K_2 – базовая; K_3 – конструкционная и метод их структурного анализа</p>	<p>$K_1 = XYZOC_{h,v}$ 0 – неподвижная деталь станка; X, Y, Z – линейные координатные движения в указанных направлениях; $C_{h,v}$ – вращение шпинделя горизонтального или вертикального</p>
<p>Матричная форма преобразований координат: вращений и переносов. Схемы компоновок при наличии трех видов связей</p>	<p>$K = k_1 k_2, \dots, k_i 0 k_{i+1}, \dots, k_n 0$ – неподвижная деталь станка, $k_i = 1, 2, \dots, 6$ – номер матриц перемещения (1, 2, 3) или вращения (4, 5, 6)</p>
<p>Граф связей деталей и узлов станка от инструмента к столу. Классы форм и функций деталей и узлов (модулей) и их ГТ (групповая технология) коды</p>	<p>Граф связей деталей и узлов станка от инструмента к столу – силовой контур. Типовые графы представления структур станков</p>
<p>Матричная форма преобразований координат: вращений и переносов. Классы (коды) подвижных и неподвижных деталей и узлов</p>	<p>$K = k_1^m k_2^m \dots k_i^m 0 k_{i+1}^m \dots k_n^m$ 0 – неподвижная деталь, $m = 0, 1, 2$ – установочные движения: 0 – не связанные с обработкой, $1, 2$ – связанные с обработкой; $k_i = 1, 2, \dots, 6$ – номер матриц перемещения (1, 2, 3) или вращения (4, 5, 6)</p>
<p>Матричная форма преобразований координат: вращений и переносов. Оценка количества вариантов компоновок. Оценка характеристик объема рабочего пространства станка и инструмента</p>	<p>$K = TTRRT'T'R'R'$, где $TR(T'R')$ – соответственно матрицы линейного (T), вращательного (R) движения в направлении или вокруг соответствующих осей координат инструмента (детали). $\sum (T_i R_i) + (T_j R_j) = 5$</p>
<p>Матричная форма преобразований координат: вращений и переносов. Схемы компоновок. Функции формирования формы рабочего объема и его определение</p>	<p>$K = k_1 k_2, \dots, k_i 0 k_{i+1} \dots k_n$ $r_0 = A^{k_1} A^{k_2} \dots A^{k_n} A_0^5 r_T$, – соответственно матрицы линейного $A_{x,y,z}^{1,2,3}$ и вращательного движения $A_{\alpha,\beta,\gamma}^{4,5,6}$ в направлении X, Y, Z или вокруг осей OX, OY, OZ координат</p>
<p>Матричная форма преобразований. Модуль движения/положения – последовательное размещение элементов, которые отражают матрицы единичного движения/положения. Модуль состоит из семи элементов составляющих модулей: базового, в котором отсутствует движение; трех модулей линейного движения/положения и трех модулей движения/положения поворота (вращения). Движение – преобразование, при котором расстояние между любыми двумя точками равно расстоянию между их образами. Тогда и поворот является движением. Положение – преобразование, которое изменяет ориентацию образа. Следовательно, любое движение является или параллельным переносом, или поворотом, или симметрией, или комбинацией симметрии и параллельного переноса на вектор, параллельный оси симметрии (теорема Шаля). Схемы компоновок. Общее число возможных компоновок металлорежущих станков составит: $K = \sum_{n=3}^7 P_n = 6 + 24 + 120 + 720 + 5040 = 5910$</p>	<p>$K = K_{xx} M_{xx}^k L_{yy}^{yy} K_{yy} M_{yy}^k L_{zz}^{zz} K_{zz} M_{zz}^k L_{xx}^{xx} K_{xx} M_{xx}^k L_{yy}^{yy} K_{yy} M_{yy}^k L_{zz}^{zz} K_{zz} M_{zz}^k$, где $K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}, K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$ – код модуля (аналог главных напряжений тензора напряжений) – характеристика направления размещения и состава модуля; $M_{ij}^k = M_0 M_x M_y M_z M(\alpha_x) M(\alpha_y) M(\alpha_z)$ – матрица движения/положения элементов модуля, $k = 0, 1 \dots 6$ – порядковый номер элемента модуля; $\bar{M}_{ij}^{jj} = M_x M_y M_z$ – матрица относительного движения базового модуля K_{ij} относительно базового модуля K_{ij} $L_i^n R^n L^n R^n = L$ – обобщенная матрица направляющих. $L_x^n = L_{xx}^{zz}, L_{xx}^{yy}, L_{xx}^{zz}, L_{xx}^{yy}, L_{xx}^{\alpha_x}, L_{xx}^{\alpha_x}$, где x – направление перемещения, n – индекс номера направляющей, xx – индекс направления перемещения в координатной системе модуля движения/положения, zz, yy, α_x – индексы направления расположения плоскости направляющей</p>

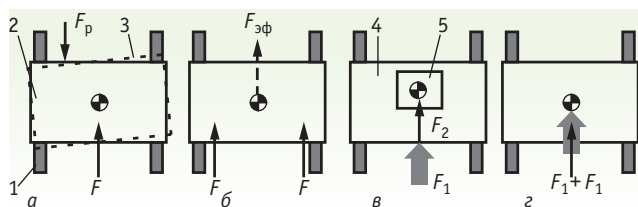


Рис. 9. Схемы приводов подач металлорежущих станков: а и б – с одним и с двумя приводами; в и г – последовательный и параллельный гибридные приводы; F_p – сила резания, $F_{эф}$ – эффективная сила движения, 1 – направляющая, 2 – стол, 3 – рыскание, 4 и 5 – грубое и точное перемещения

в табл. 7. В обоих случаях применения приводов (шари-ко-винтовых или линейных) основная проблема достижения высоких значений их параметров связана с необходимостью снижения уровня нагрева и динамических характеристик, которые для шарико-винтовых передач (резонансная частота колебаний) являются лимитирующими в реально достижимой скорости перемещений.

Анализ данных параметров и характеристик показывает, что далеко не во всех случаях линейные двигатели имеют неоспоримое преимущество, так же как и шарико-винтовые передачи. Поэтому при создании станков требуется находить наилучшее или компромиссное решение при выборе вида привода подачи и его конструктивного исполнения. Конструкции станков, разработанные для традиционных технологий обработки металлов резанием, не в полной мере соответствуют запросам производства в отношении величин подачи, в связи с чем к эксплуатационным характеристикам приводов предъявляются новые требования, обусловленные более высокими параметрами резания.

Однако указанные величины достигаемых скоростей резания все еще требуют более глубокого обоснования граничных допустимых областей и их связи с физическими процессами и явлениями при резании металлов.

Процесс проектирования привода подачи (его механической части) до последнего времени сводился к выбору из области решений параметров двигателя, датчика положения и элементов механической части привода. При таком выборе учитываются энергетические, силовые и кинематические характеристики (мощность и момент привода, грузоподъемность и шаг передачи винт-гайка качения, требуемый диапазон частот вращения двигателя и т.п.), расчет на долговечность. Фактически, на этапе проектирования механической части привода подачи, анализ его динамических характеристик не проводится. Следствием такого подхода является недостаточная обоснованность принимаемых конструктором решений в отношении динамического качества и точности привода подачи.

Упругие свойства и распределенные инерционные характеристики механизмов привода подачи, и в первую

Таблица 7. Сравнительные параметры приводов подач

Наименование параметра	Привод на основе винт-гайка качения/двигатель	Линейный привод подачи
Максимальная скорость, м/с	0,8–1	> 3–5
Максимальное ускорение, м/с ²	5–10	20–100
Точность позиционирования, мкм	< 1	< 2
Статическая жесткость, кгс/мм	10–20	3–30
Динамическая жесткость, кгс/мм	10–20	5–20
Максимальное усилие, кН	26,5	9,0
Время остановки, мс	< 100	< 20
Долговечность, ч	< 10 000	< 50 000

очередь тяговых устройств, оказывают существенное влияние на их динамические характеристики, а возникающие в механической части резонансные явления препятствуют увеличению до требуемого уровня скоростей. Основные допустимые характеристики приводов в каталогах заводов производителей.

Наиболее радикальным решением этих проблем является переход к линейному приводу. Однако линейные приводы в силу своих свойств (относительно малое тяговое усилие, большое тепловыделение, высокая стоимость и др.) еще не находят широкого применения в металлорежущих станках общего назначения.

Повышение скорости подачи в приводах винт-гайка качения осуществляется за счет увеличения скорости вращения и шага винта. Частота вращения винта ограничивается быстроходностью передачи, которая достигает $D \cdot n = (1-1,5 (2)) \cdot 10^5$ мм·об/мин. Это позволяет обеспечить скорость быстрых перемещений рабочего органа до 20–32 (40) м/мин (для винта диаметром 50 мм с шагом 10 мм). Увеличение шага винта до 20–40 мм в сочетании с применением модульных направляющих качения позволяет повысить предельную скорость перемещения рабочего органа соответственно до 60–120 м/мин. Однако шарико-винтовые передачи повышенной быстроходности выполняются с минимальными натягами, что снижает их жесткость. Увеличение шага винта также негативно сказывается на жесткости. Решением данной проблемы может быть переход к многозаходным винтовым передачам, однако их применение ограничивается недостаточной точностью. Поэтому в настоящее время предельные скорости перемещения приводов с винтовыми передачами редко превышают 60 м/мин.

Таким образом, в конструкциях станков широкого (общего) назначения доминируют приводы с механическими тяговыми устройствами передачи

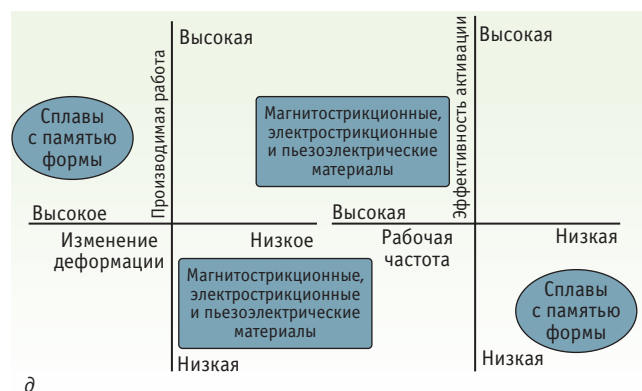
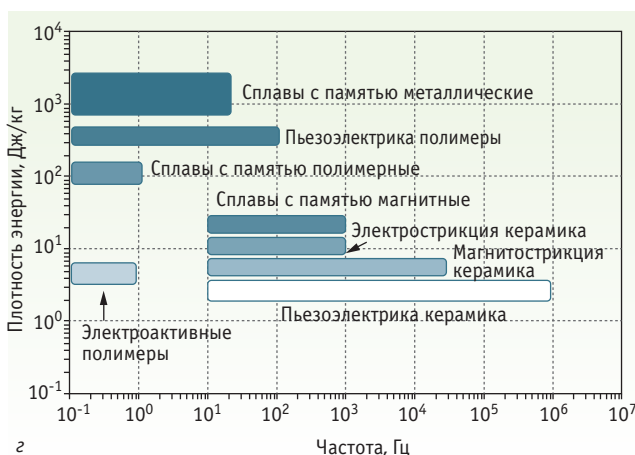
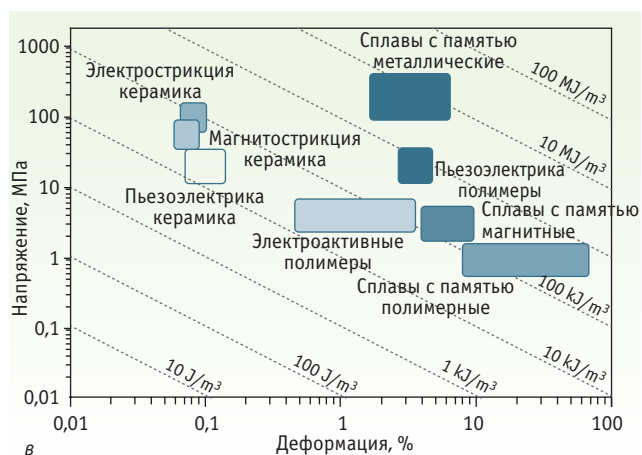
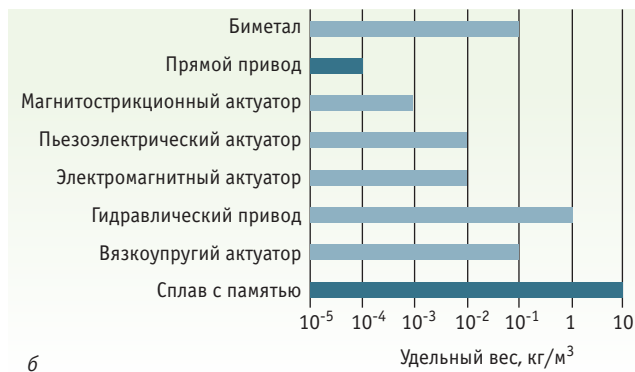
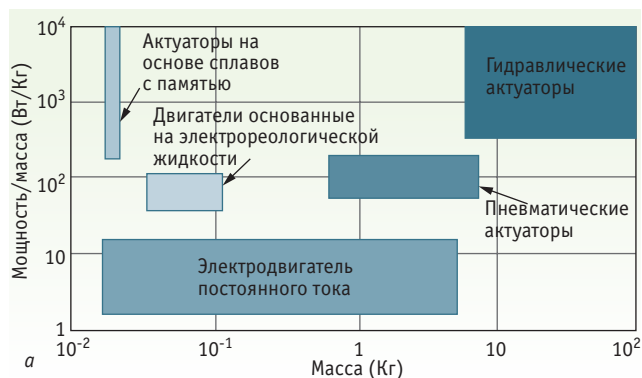


Рис. 10. Сравнительные характеристики актуаторов: а – развиваемая мощность на единицу массы; б – сравнительная удельная работа; в – соотношение напряжение/деформация и удельной энергии; г – частотные диапазоны применения; д – сопоставимые качественные характеристики материалов и сплавов

винт-гайка качения, а для перемещения узлов более 5–6 м применяются зубчато-реечные или червячно-реечные передачи.

Перспективные области инновационных исследований – это так называемые «интеллектуальные» или «умные» материалы и конструкции, которые включают в себе функциональные возможности сенсоров, датчиков и/или исполнительных механизмов. Функциональность привода означает изменение формы, положения, частоты или других механических свойств в зависимости от изменения температуры, электрических или магнитных полей.

Наиболее часто используются интеллектуальные материалы для приводов станков. На рис. 10 приведены сопоставительные параметры и характеристики «умных» материалов как основа эффективных

направлений их применимости в станках. Ведутся также разработки и уже созданы элементы станка, которые полностью или преимущественно состоят из интеллектуальных материалов, представляют собой интеллектуальные структуры, объединяющие традиционные структуры с интеллектуальными элементами, такими как встроенные датчики или исполнительные механизмы.

КУЗНЕЦОВ Александр Павлович –

доктор технических наук, профессор кафедры станков МГТУ «СТАНКИН»

Продолжение статьи будет опубликовано в следующем номере журнала.